

Niko Ekholm

Taajuusmuuttajan välipiirin elektrolyyttikondensaattoreiden elvyttäminen pitkän seisontajakson jälkeen

Metropolia Ammattikorkeakoulu
Insinööri (AMK)
Elektroniikka
Insinöörityö
29.3.2012

Tekijä Otsikko Sivumäärä Aika	Niko Ekholm Taajuusmuuttajan välipiirin elektrolyyttikondensaattoreiden elvyttäminen pitkän seisonajakson jälkeen 37 + 2 liitettä 29.3.2012
Tutkinto	insinööri (AMK)
Koulutusohjelma	elektroniikka
Suuntautumisvaihtoehto	
Ohjaajat	lehtori Jari Ijäs, Metropolia Ammattikorkeakoulu tuotekehitysinsinööri Ville Niemi, Konecranes Oyj
<p>Tämä insinöörityö on tehty Konecranes Oyj:n tuotekehityksikölle Hyvinkäällä. Työssä etsittiin ja tutkittiin erilaisia menetelmiä pitkään jännitteettömänä olleen jännitevälipiirillisen taajuusmuuttajan välipiirin elektrolyyttikondensaattoreiden elvyttämiseen.</p> <p>Työssä tutustuttiin taajuusmuuttajien toimintaan ja erityisesti jännitevälipiirilliseen taajuusmuuttajaan. Työn alussa on käyty läpi elektrolyyttikondensaattoreiden ominaisuuksia ja niiden elvyttämistä pitkän seisonajakson jälkeen. Tavoitteena oli saada tarvittavaa tietoa elektrolyyttikondensaattoreiden ominaisuuksista.</p> <p>Teoriaosuuden jälkeen työssä on kuvattu taajuusmuuttajan elvyttämiseen käytettävän apulaitteen tarvetta sekä esitetty kaksi ratkaisuvaihtoehtoa taajuusmuuttajan elvyttämiseen. Ratkaisuvaihtoehtoja testattiin ja niitä verrattiin nykyisin käytössä olevaan DC-jännitelähteellä toteutettuun elvyttämiseen.</p> <p>Työn lopussa on esitetty testitulokset, joissa pohditaan, sopivatko ratkaisuvaihtoehdot taajuusmuuttajan elvyttämiseen. Jatkotyönä pyritään valmistamaan apulaite, jolla taajuusmuuttajan elvyttäminen onnistuisi yhtä hyvin kuin DC-jännitelähteellä.</p>	
Avainsanat	elektrolyyttikondensaattori, elvyttäminen, DC-jännitelähde

Author Title	Niko Ekholm Frequency converter DC link's electrolytic capacitors reforming
Number of Pages Date	37 pages + 2 appendices 29 Mar 2012
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Electronics
Specialisation option	
Instructors	Jari Ijäs, Senior Lecturer, Metropolia University of Applied Sciences Ville Niemi, R&D Engineer, Konecranes Oyj
<p>This bachelor's thesis was carried out for research & development unit at Konecranes Oyj located in Hyvinkää. The purpose of this thesis was to research different methods for frequency converter DC link's electrolytic capacitors reforming.</p> <p>The functioning of frequency converter and especially voltage source inverter is studied in this thesis. The thesis starts with a look into the characteristics of electrolytic capacitor and capacitor reforming, with an aim to get information about electrolytic capacitors.</p> <p>After the theoretical part, the reason why the electrolytic capacitors reforming device is needed is discussed. Also two different methods for electrolytic capacitors reforming are presented. Both methods were tested and compared to capacitors reforming done by DC voltage source. The purpose of these tests was to find the best method for frequency converter DC link's electrolytic capacitors reforming.</p> <p>The test results are presented at the end of thesis. This thesis can be used as information source for designing the capacitor reforming device.</p>	
Keywords	Electrolytic capacitor, Reforming, DC voltage source

Sisällys

Tiivistelmä

Abstract

Sisällys

Lyhenteet ja symbolit

1 Johdanto	1
2 Taajuusmuuttaja	2
2.1 Suorat taajuusmuuttajat	2
2.2 Välipiirilliset taajuusmuuttajat	3
2.2.1 Virtavälipiirilliset taajuusmuuttajat	4
2.2.2 Jännitevälipiirilliset taajuusmuuttajat	5
3 Elektrolyyttikondensaattorit	8
3.1 Elektrolyyttikondensaattorin rakenne	8
3.2 Elektrolyyttikondensaattorin ominaisuudet	9
3.3 Elektrolyyttikondensaattorin elinikä	11
4 Elektrolyyttikondensaattoreiden elvyttäminen	13
5 Apulaitteen konseptin suunnittelu	15
6 Elvyttämiskäytösvalinnat	16
6.1 Säädetty DC-jännitelähde	16
6.2 Diodi-vastus-kytkentä	17
6.3 Säädetty AC-jännitelähdekytkentä	18
7 Elvyttämiskäytösvalintojen testaaminen	19
7.1 Testitulokset	19
7.1.1 Säädetty DC-jännitelähde	19
7.1.2 Diodi-vastus-kytkentä	24
7.1.3 Säädetty AC-jännitelähdekytkentä	29
7.2 Testitulosten yhteenveto	35
8 Johtopäätökset	36

Liitteet

Liite 1. Sähkökuvat testilaatikosta

Liite 2. Kuvat testilaatikosta ja testijärjestelyistä

Lyhenteet ja symbolit

Lyhenteet

CSI	Current Source Inverter; virtavälipiirillinen taajuusmuuttaja
DI1	Digital Input 1; taajuusmuuttajan suuntakäsky
DI3	Digital Input 3; taajuusmuuttajan kiihdytyskäsky
ESR	Equivalent Series Resistance; sarjaresistanssi
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor; eristehilabipolaaritransistori
LCI	Load Commutated Inverter; kuormakommutoitu taajuusmuuttaja
PWM	Pulse-Width Modulation; pulssinleveysmodulointi

Symbolit

C	kapasitanssi
d	eristekerroksen paksuus (cm)
ϵ	eristekerroksen suhteellinen permittiivisyys
F	faradi; kapasitanssin yksikkö
L	sarjainduktanssi
r	rinnakkaisresistanssi
R	sarjaresistanssi
S	eristekerroksen pinta-ala (cm ²)

1 Johdanto

Taajuusmuuttajia käytetään monenlaisissa teollisuuden sovelluksissa muun muassa sähkömoottoreiden pyörimisnopeuden säätämiseen. Tyypillisimpiä käyttökohteita ovat pumppu- ja puhallinkäytöt, nosturit, hissit, paperikoneiden voimansiirto, tuulivoimalat, kompressorit, kuljettimet, aurinkovoima ja sähköautot.

Jännitevälipiirilliset taajuusmuuttajat sisältävät suuria elektrolyyttikondensaattoreita, joiden oksidikerros heikkenee pitkän seisonajakson jälkeen. Tällöin elektrodien välissä ei enää ole eristemateriaalia, ja kondensaattori on oikosulussa. Oksidikerroksen heikkenemisen takia pitkään varastossa olleet taajuusmuuttajat täytyy elvyttää ennen käyttöönottoa, jotta säästytään laitevauriolta ja niistä johtuvilta tuotantokatkoilta.

Tämä insinööri työ on tehty Konecranes Oyj:n tuotekehitysyksikköön, ja se käsittelee jännitevälipiirillisen taajuusmuuttajan välipiirin elektrolyyttikondensaattoreiden elvyttämistä pitkän seisonajakson jälkeen. Työn alussa perehdytään taajuusmuuttajien teoriaan ja toimintaan sekä tarkemmin jännitevälipiirilliseen taajuusmuuttajaan, ja sen välipiirin elektrolyyttikondensaattoreihin. Lisäksi elektrolyyttikondensaattoreiden elvyttämiseen perehdytään perusteellisesti.

Työssä etsitään ja tutkitaan erilaisia ratkaisuvaihtoehtoja toteuttaa elektrolyyttikondensaattoreita sisältävän taajuusmuuttajan hallittu käyttöönotto pitkän seisonajakson jälkeen. Muutamia ratkaisuvaihtoehtoja tutkitaan ja testataan käytännössä. Lopuksi valitaan teknisten ja kaupallisten näkökulmien pohjalta mahdollisesti paras ratkaisu jatkotyönä tuotteistettavaksi.

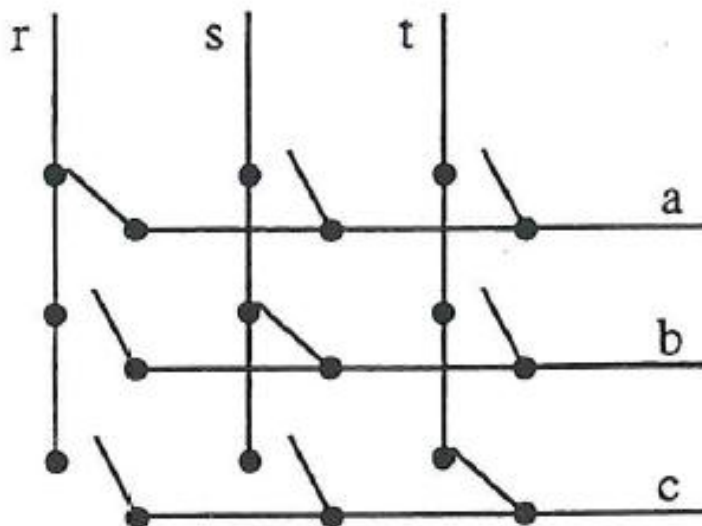
2 Taajuusmuuttaja

Taajuusmuuttaja on sähkölaite, jota käytetään yhdistämään kaksi erilaista sähköverkkoa toisiinsa. Usein taajuusmuuttaja kytketään sähkömoottorin tai -generaattorin ja valtakunnallisen sähköverkon välille, jolloin se vastaa sähkömoottorin tai generaattorin ohjauksesta. Taajuusmuuttajien suurimpiin etuihin kuuluvat portaaton pyörimisnopeudensäätö ja tästä johtuvat mahdollisuudet energiansäästöön. Taajuusmuuttajat jaetaan yleensä kahteen päätyyppiin: suoriin ja välipiirillisiin taajuusmuuttajiin.

2.1 Suorat taajuusmuuttajat

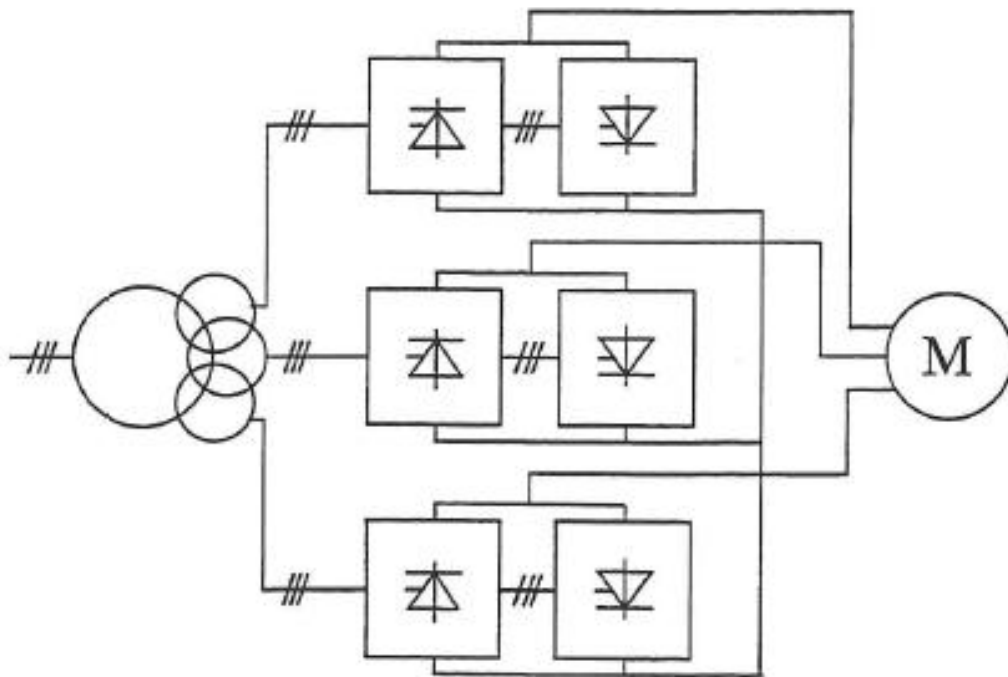
Suorissa taajuusmuuttajissa syötettävä vaihtosähkö pilkotaan suoraan halutun taajuiseksi ja jännitteiseksi vaihtosähköksi puolijohdekytkimillä. Suorat taajuusmuuttajat jaetaan syklokonverttereihin ja matriisimuuttajiin.

Kuvassa 1 esitetään matriisimuuttajan kytkentämalli. Matriisimuuttaja koostuu yhdestä kytkimestä, joilla jokainen lähtövaihe voidaan kytkeä jokaiseen tulovaiheeseen. Matriisimuuttajan lähtöjännitteeseen valitaan kytkimillä paloja eri syöttöverkon vaihejännitteistä siten, että sekä lähtöjännitteen keskiarvo että syöttöverkon vaihevirrran keskiarvo muuttuvat sinimuotoisesti.



Kuva 1. Matriisimuuttajan kytkentämalli [1]

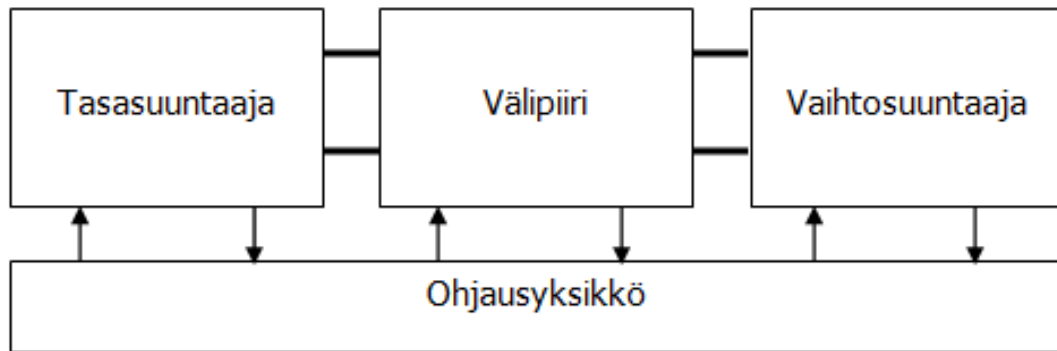
Syklokonvertteri kuvassa 2 koostuu kolmesta vastarinnankytketystä tyristorisillasta. Kutakin tyristorisiltaa syötetään omasta muuntajan kolmivaiheisesta toisiosta. Syklokonvertteri voidaan toteuttaa myös ilman muuntajaa, mutta tällöin moottorin käämien on oltava erillisiä, jotta vältetään oikosuluilta. Tämä tarkoittaa, että syklokonverterilla ja moottorilla ei saa olla tähtipisteitä. [1, s. 50–52.]



Kuva 2. Syklokonvertterin kytkentämalli [1]

2.2 Välipiirilliset taajuusmuuttajat

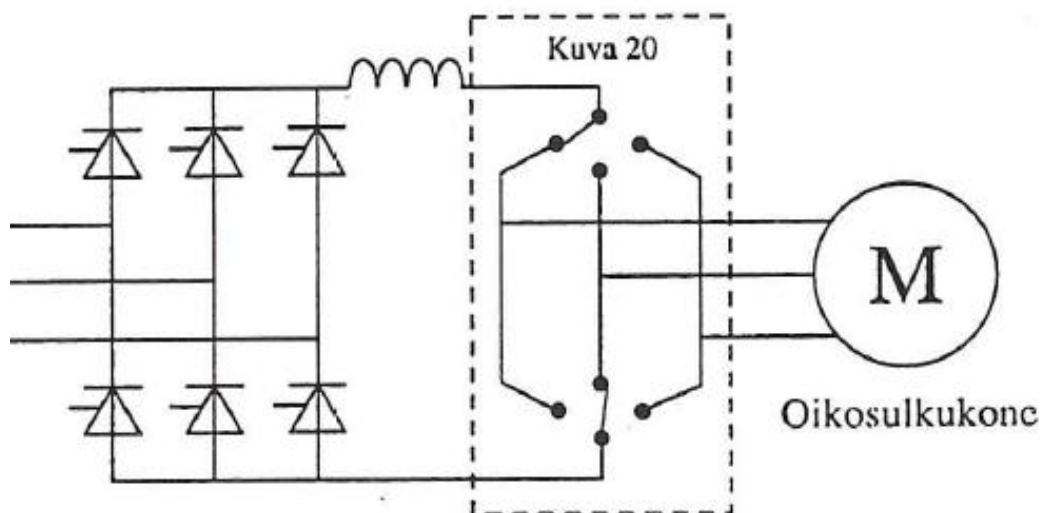
Välipiirilliset taajuusmuuttajat muuttavat sähköverkon sähkön ensin tasasähköksi ja sitten takaisin vaihtosähköksi moottorille. Kuten kuvan 3 lohkoakaaviossa esitetään (ks. seur. s.), välipiirillinen taajuusmuuttaja koostuu neljästä pääosasta: tasasuuntaajasta, välipiiristä, vaihtosuuntaajasta ja ohjausyksiköstä. Välipiirilliset taajuusmuuttajat jaetaan virta- ja jännitevälipiirillisiin taajuusmuuttajiin. Tässä työssä perehdytään tarkemmin jännitevälipiirillisiin taajuusmuuttajiin, sillä virtavälipiirilliset taajuusmuuttajat eivät sisällä välipiirin elektrolyyttikondensaattoreita. [1, s. 48.]



Kuva 3. Välipiirillisen taajuusmuuttajan lohkoakaavio

2.2.1 Virtavälipiirilliset taajuusmuuttajat

Virtavälipiirillisessä taajuusmuuttajassa, josta käytetään lyhennettä CSI, välipiiri koostuu tasoituskuristimesta, jonka tarkoituksena on pienentää tasavirran aaltoisuutta. Kuvas-
sassa 4 esitetään peruskytkentä virtavälipiirillisestä taajuusmuuttajasta, jonka vaihtosuuntaaja on toteutettu kytkimillä.

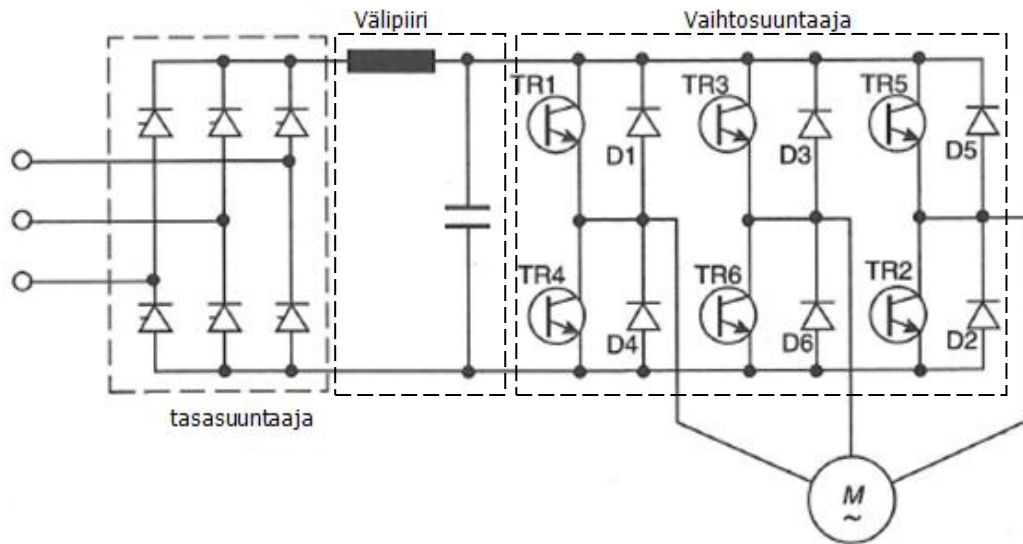


Kuva 4. Virtavälipiirillinen taajuusmuuttaja [1]

Yksinkertaisin virtavälipiirillinen taajuusmuuttaja on kuormakommutoitu taajuusmuuttaja, josta käytetään lyhennettä LCI. Kuormakommutoitu taajuusmuuttaja koostuu kahdesta tyristorisillasta, joista toinen on kytketty sähköverkkoon ja toinen tahtimoottoriin. [1, s. 48–50.]

2.2.2 Jännitevälipiirilliset taajuusmuuttajat

Jännitevälipiirillinen taajuusmuuttaja koostuu tasasuuntaajasta, välipiiristä ja vaihtosuuntaajasta. Kuvassa 5 esitetään jännitevälipiirillinen taajuusmuuttaja, jonka tasasuuntaaja on toteutettu tyristoreilla ja vaihtosuuntaaja transistoreilla ja diodeilla:

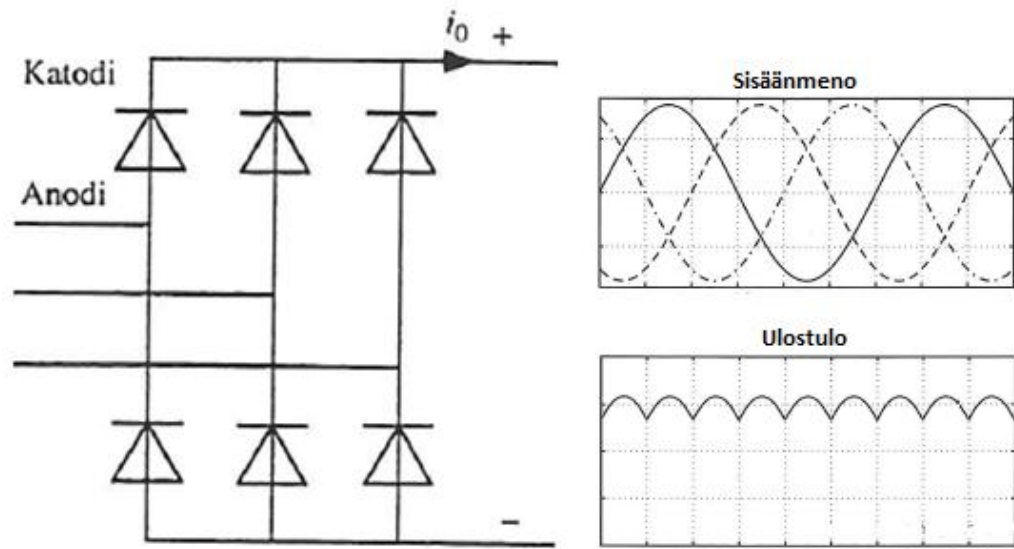


Kuva 5. Jännitevälipiirillinen taajuusmuuttaja [2]

Tasasuuntaaja

Tasasuuntaajan tehtävänä jännitevälipiirillisessä taajuusmuuttajassa on tuottaa sähköverkosta tasajännitettä välipiirille. Tasasuuntaajat jaetaan kahteen ryhmään, ohjattuihin ja ohjaamattomiin tasasuuntaajiin. Tasasuuntaaja voidaan rakentaa tyristoreilla, diodeilla, tehotransistoreilla tai näiden yhdistelmillä. Diodeilla rakennettua tasasiltaa kutsutaan ohjaamattomaksi tasasuuntaajaksi. Jos silta on toteutettu diodien ja tyristorien yhdistelmällä, tasasuuntaaja on puoliksi ohjattu. Sen sijaan pelkillä transistoreilla tai tyristoreilla rakennettu tasasuuntaaja on täysin ohjattu tasasuuntaaja. [2.]

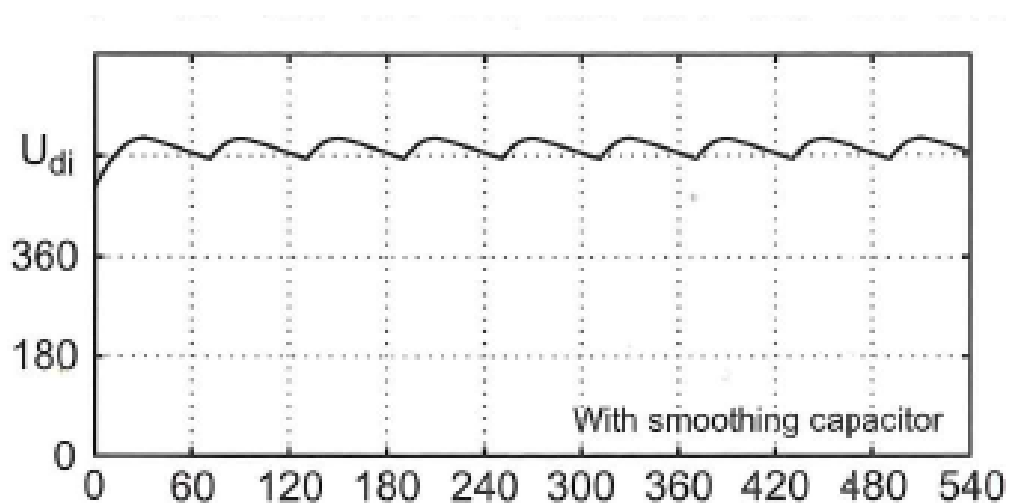
Yleisin tasasuuntaajatyyppe on kuusipulssitasasuuntaaja. Kuvassa 6 (ks. seur. s.) esitetään diodeilla toteutettu kuusipulssitasasuuntaaja ja sen toimintaperiaate. Tasasuuntaajalle syötetään kolmivaiheista sinimuotoista jännitettä, jolloin ulostulosta saadaan sykkeistä tasajännitettä.



Kuva 6. Diodeilla toteutettu kuusipulssitasasuuntaaja ja sen toimintaperiaate [1; 3]

Välipiiri

Välipiirin tehtävänä on toimia taajuusmuuttajan energiavarastona. Jännitevälipiirillisessä taajuusmuuttajassa energian varastointiin käytetään elektrolyyttikondensaattoreita. Tasasuuntaajalta saadaan lähtöjännite, jossa on vaihtokomponentti, jonka välipiirin elektrolyyttikondensaattorit suodattavat tasajännitteeksi. Kuvassa 7 esitetään elektrolyyttikondensaattoreiden suodattama tasajännite. Välipiiristä saadaan myös energia taajuusmuuttajan ohjauselektronikalle. [2.]



Kuva 7. Välipiirin elektrolyyttikondensaattoreiden suodattama tasajännite [3]

Vaihtosuuntaaja

Vaihtosuuntaajan tehtävä taajuusmuuttajassa on muuttaa tasajännite takaisin vaihtojännitteeksi halutulla taajuudella ja amplitudilla. Vaihtosuuntaaja voidaan toteuttaa esimerkiksi transistoreiden ja diodien yhdistelmällä, kuten kuvassa 5 (ks. s. 5) olevassa taajuusmuuttajassa. Jännitevälipiirillisessä taajuusmuuttajassa vaihtosuuntaus on yleensä toteutettu pulssinleveysmodulaatiolla eli PWM:llä. Siinä vakio tasajännitteestä leikataan eripituisia pulsseja, joiden keskiarvona muodostuu vaihtojännite, jonka taajuus ja amplitudi muuttuvat. [2; 4.]

Ohjauselektronikka

Ohjauselektronikka ohjaa vaihtosuuntaajan lähtötransistorien kytkeytymistä, mittaa välipiirin jännitettä, lähtövirtoja sekä hoitaa kommunikoinnin esimerkiksi ohjauspaneelin kanssa.

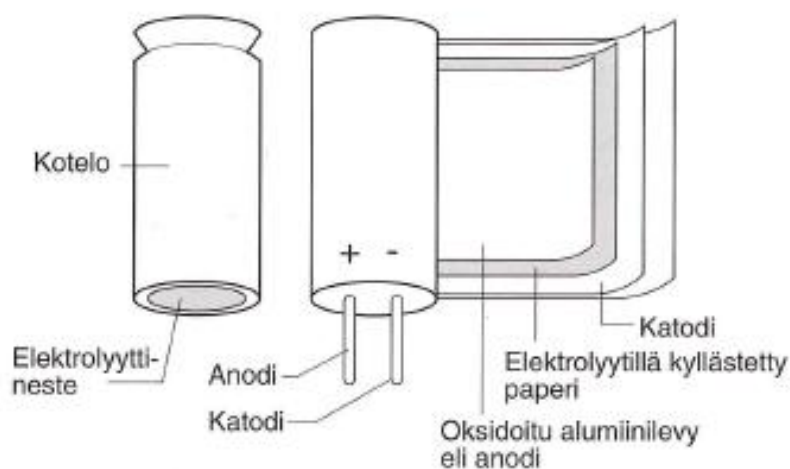
3 Elektrolyyttikondensaattorit

Jännitevälipiirillisen taajuusmuuttajan välipiirissä käytetään suuria elektrolyyttikondensaattoreita tasajännitteen tasaamiseen ja energian varastointiin.

3.1 Elektrolyyttikondensaattorin rakenne

Elektrolyyttikondensaattori muodostuu kahdesta alumiinifoliosta ja kahdesta paperisuikaleesta, jotka on pinottu vuorotellen päällekkäin ja kierretty rullalle. Alumiinifolioiden pinta-alaa on kasvatettu syövyttämällä niiden pintaa sienimäiseksi. Toisen alumiinifolion pintaan on synnytetty elektrolyytisesti ohut alumiinioksidikerros. Tämä oksidoitu alumiinifolio toimii positiivisena elektrodina (anodi) ja sen pinnassa oleva oksidi kondensaattorin eristeenä. Negatiivisena elektrodina (katodi) toimii paperiin imetty elektrolyyttiliuos, johon lähes ilman oksidia oleva alumiinifolio muodostaa kontaktin.

Alumiinifolioiden ja paperisuikaleiden muodostama käämirulla on suljettu pyöreään alumiinikoteloon, joka on galvaanisessa yhteydessä katodiin. Kontaktit folioihin on yleensä tehty rullan väliin asetetuilla alumiiniliuskoilla, jotka on kiinnitetty kotelon kannessa oleviin liittimiin. Galvaanisen yhteytensä johdosta alumiinikotelo on jännitteinen osa. Koteloa ei kuitenkaan saa käyttää sähköisiin liitännöihin, sillä galvaaninen yhteys ei välttämättä ole riittävän hyvä kuormavirran välittämiseksi. Kuvassa 8 esitetään elektrolyyttikondensaattorin rakenne. [5, s. 167.]



Kuva 8. Elektrolyyttikondensaattorin rakenne [6]

3.2 Elektrolyyttikondensaattorin ominaisuudet

Elektrolyyttikondensaattoreille on ominaista fyysiseen kokoon nähden suuri kapasitanssi, koska sienimäisen folion ja alumiinioksidin ansiosta kondensaattorin pinta-ala on suuri ja eristekerroksen paksuus pieni. Eristekerroksen paksuus vaihtelee jossain määrin käyttötilanteen mukaan. Tämän takia kapasitanssiarvojen toleranssit ovat useimmiten suuria -10—+50 %. Tyypillisesti elektrolyyttikondensaattorit tarjoavat kapasitanssiarvoja 0.1 μF –3 F ja jännitekestoisuuden 5–500 V. Seuraavassa yhtälössä 1 esitetään elektrolyyttikondensaattorin kapasitanssin laskukaava:

$$C = 8.885 \cdot 10^{-8} \frac{\epsilon S}{d} (\mu\text{F}) \quad (1)$$

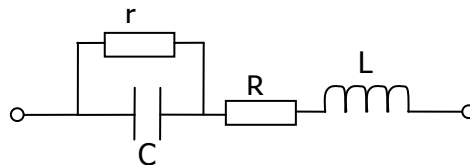
ϵ on eristekerroksen suhteellinen permittiivisyys

S on eristekerroksen pinta – ala (cm^2)

d on eristekerroksen paksuus (cm)

Elektrolyyttikondensaattorin kapasitanssia saadaan kasvatettua pienentämällä eristekerroksen paksuutta ja suurentamalla eristekerroksen pinta-alaa sekä suhteellista permittiivisyyttä.

Kuvassa 9 esitetään elektrolyyttikondensaattorin sijaiskytkentä. Sijaiskytkentä koostuu kapasitanssista C , rinnakkaisresistanssista r , sarjaresistanssista R ja sarjainduktanssista L .



Kuva 9. Elektrolyyttikondensaattorin sijaiskytkentä

Elektrolyyttikondensaattorissa rinnakkaisvastus r kuvaa kondensaattorin oksidikerroksen resistanssia, jolloin sen suuruus vaikuttaa kondensaattorin eristeen läpi kulkevaan vuotovirtaan. Sarjaresistanssi R , joka tunnetaan myös nimellä ESR, kuvastaa elektrolyyttikondensaattorin liitosjohtimista johtuvaa resistanssia, kun taas sarjainduktanssi L liitosjohtimista johtuvaa induktanssia. Ideaalisessa elektrolyyttikondensaattorissa rinnakkaisvastuksen resistanssi on ääretön, sarjainduktanssi on nolla henryä, ja sarjavastuksen resistanssi on nolla ohmia.

Elektrolyyttikondensaattorin ominaisuuksiin vaikuttaa myös kapasitiivinen reaktanssi, jonka yksikkö on ohmi. Kapasitiivisen reaktanssin suuruuteen vaikuttaa kondensaattorin kapasitanssi C ja taajuus f . Tasavirralla reaktanssi on käytännössä äärettömän suuri, ja vaihtovirralla reaktanssi pienenee taajuuden kasvaessa, joten riittävän suurella taajuudella kondensaattori on oikosulussa. Seuraavassa yhtälössä 2 esitetään kapasitiivisen reaktanssin laskukaava:

$$X_C = \frac{1}{2\pi fC} \quad (2)$$

Pienillä taajuuksilla elektrolyyttikondensaattorin induktanssi on käytännössä nolla henryä ja kapasitiivinen reaktanssi äärettömän suuri. Sijaiskytkennän kokonaisimpedanssi on silloin sarja- ja rinnakkaisvastuksien resistanssien summa. Käytännössä impedanssin määrää yksistään rinnakkaisvastus. Taajuuden kasvaessa kapasitiivinen reaktanssi alkaa pienentyä, mistä seuraa myös kokonaisimpedanssin pientyminen. Yli 100 kHz:n taajuuksilla kondensaattorin impedanssi alkaa puolestaan kasvaa sarjainduktanssin takia. Tämän takia elektrolyyttikondensaattori ei kykene suurtaajusten virta komponenttien suodatukseen.

Elektrolyyttikondensaattorit eivät kestä yli yhden voltin negatiivista jännitettä, koska elektrolyyttisen prosessin suunta muuttuu, jolloin anodifolion pinnassa oleva oksidikerros alkaa heikentyä. Oksidikerroksen heikentyessä elektrolyyttikondensaattorin vuotovirta kasvaa äkillisesti, ja sen tuottaman häviötehon tullessa riittävän suureksi voi kondensaattori räjähtää sisälle muodostuvan ylipaineen johdosta. Tämän takia kondensaattoreita ei voida käyttää sovelluksissa, joissa jännitteen polariteetti voi muuttua.

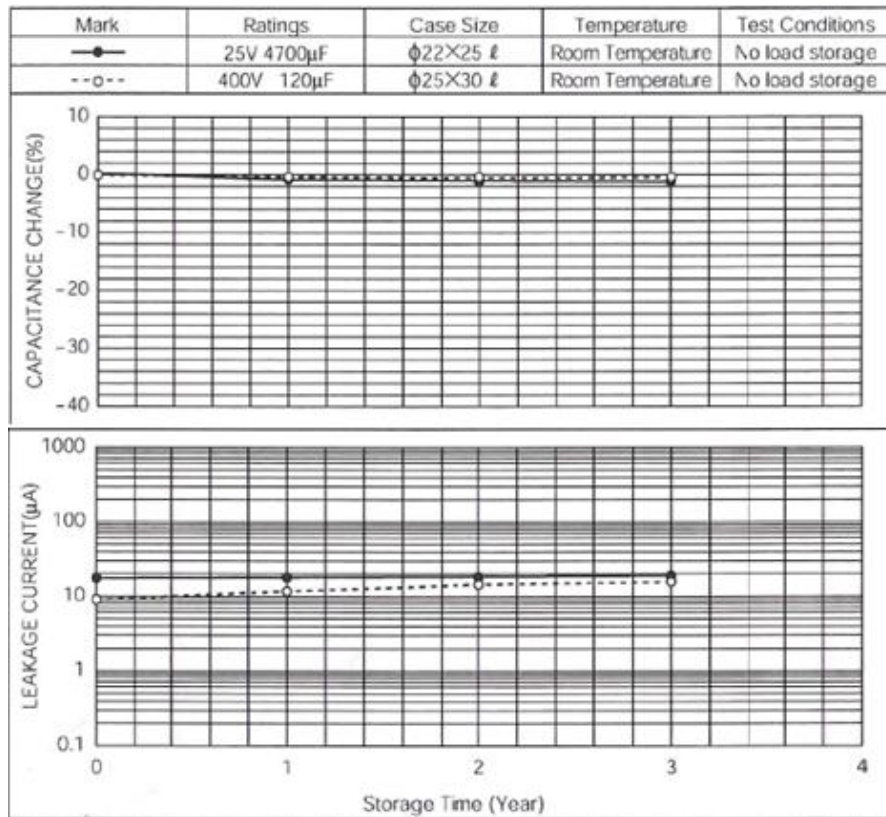
Suuremmissa elektrolyyttikondensaattoreissa on yleensä ylipaineventtiili, joka suojaa kondensaattoria räjähtämiseltä, mutta pienemmistä kondensaattoreista ylipaineventtiili puuttuu. Tämän takia pienempiä elektrolyyttikondensaattoreita käytettäessä täytyy olla huolellinen, sillä alle sentinkin kokoinen kondensaattori voi räjähtäessään aiheuttaa henkilövahinkoja. [5, s. 167–170; 6, s. 120, 126–128; 7.]

3.3 Elektrolyyttikondensaattorin elinikä

Tavallisen elektrolyyttikondensaattorin käyttöikä on noin 20 000 tuntia +60 °C:n ympäristölämpötilassa. Käyttölämpötila vaikuttaa elektrolyyttikondensaattorin ikääntymiseen merkittävästi, sillä käyttöikä kaksinkertaistuu jokaista 7–10 °C:n lämpötilan alennusta kohden. Lämpötilan kasvaessa elektrolyyttikondensaattorin vuotovirta kasvaa, esimerkiksi 80 °C:n lämpötilassa kondensaattorin vuotovirta on noin neljä kertaa huoneenlämmössä mitattua suurempi. Elektrolyyttikondensaattoreita on saatavilla myös malleja, joiden käyttöikä on yli 100 000 tuntia +60 °C:n ympäristönlämpötilassa.

Elektrolyyttikondensaattorin elinikä on rajallinen lähinnä sen ikääntymisestä aiheutuvan kuivumisen takia. Kuivumisella tarkoitetaan elektrolyyttikondensaattorin elektrolyytin haihtumista, joka aiheuttaa kondensaattorin kapasitanssin pienenemistä. Kuivumisen vuoksi ESR alkaa kasvaa ja lämpeneminen lisääntyy kiihdyttäen edelleen kondensaattorin elektrolyytin kuivumista.

Elektrolyyttikondensaattorin elinikään vaikuttaa myös, jos se on ollut pitkään jännitteettömänä. Pitkään jännitteettömänä olleen elektrolyyttikondensaattorin eristemateriaalina toimiva oksidikerros heikkenee, mikä puolestaan aiheuttaa vuotovirran kasvua elektrolyttikondensaattorissa. Oksidikerroksen kadottua kondensaattori on oikosulussa, jolloin elektrolyytin läpi kulkee virtaa, ja se aiheuttaa elektrolyytin lämpenemisen, jolloin se voi höyrystyä. Tämän takia elektrolyyttikondensaattoreiden pitkäaikaista jännitteettömyyttä ei suositella. Kuvassa 10 (ks. seur. s.) esitetään, miten elektrolyyttikondensaattorin ominaisuudet muuttuvat pitkän jännitteettömyyden aikana. [5, s. 167–170; 7; 8.]



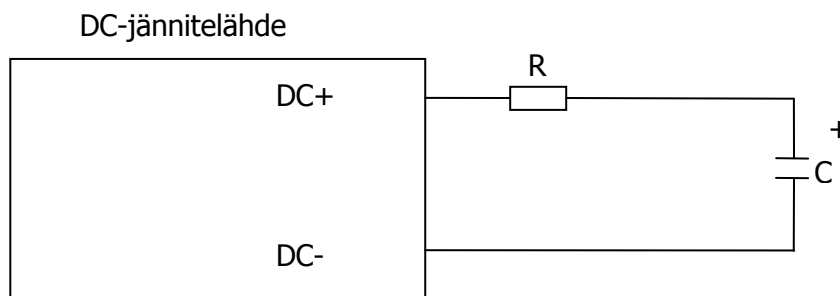
Kuva 10. Kondensaattorin kapasitanssi ja vuotovirta jännitteettömyysajan funktiona [7]

Kuvassa 10 on esitetty, että elektrolyyttikondensaattorin kapasitanssi laskee ja vuotovirta kondensaattorin sisällä kasvaa, mitä pidempään se on ollut jännitteettömänä. Kuvassa *leakage current* on vuotovirta mikroampeereina ja *capacitance change* on kapasitanssin muutos prosentteina.

4 Elektrolyyttikondensaattoreiden elvyttäminen

Elektrolyyttikondensaattorin ollessa pitkään jännitteettömänä, sen oksidikerros heikenee, jolloin kondensaattorin vuotovirta kasvaa ja jännitekestoisuus pienenee. Vuotovirta palautuu takaisin normaalille tasolle, kun elektrolyyttikondensaattori kytketään jännitteeseen, jolloin oksidikerros korjaantuu. Tapahtumasta käytetään englanninkielistä nimitystä *voltage treatment*.

Elektrolyyttikondensaattorin elvyttäminen on tärkeää, jos se on ollut yli kaksi vuotta jännitteettömänä. Elvyttämisen tarkoituksena on elvyttää elektrolyyttikondensaattori sen nimellisjännitteellä, virtaa rajoittaen. Tyypillisesti elvytysvirta on suuruusluokaltaan milliampeereja. Kuvassa 11 esitetään kytkentäkaavio elektrolyyttikondensaattorin elvyttämisestä. Siinä DC-jännitelähteellä syötetään tasajännitettä elektrolyyttikondensaattorille ja vastuksella rajoitetaan, ettei elvytysvirta kasva liian suureksi.



Kuva 11. Elektrolyyttikondensaattorin elvytysmalli

Elvytyksen tarkasta kestoajasta ei ole olemassa tarkkaa sääntöä, mutta yleensä elektrolyyttikondensaattoria elvytetään sen nimellisjännitteellä noin 30 minuutista muutama tuntiin. Elvytysaika määräytyy siitä, kuinka kauan elektrolyyttikondensaattori on ollut jännitteettömänä. Esimerkiksi, jos elektrolyyttikondensaattori on ollut jännitteettömänä kaksi vuotta, elvyttämisen kokonaiskesto aika on noin kaksi tuntia.

Elektrolyyttikondensaattoreiden elvyttäminen on mahdollista myös nimellisjännitettä pienemmällä jännitteellä, tällöin kuitenkin elvytysaika kasvaa. Lopullinen oksidikerroksen korjaantuminen tapahtuu kuitenkin vasta, kun elektrolyyttikondensaattori kytketään sen nimellisjännitteeseen. [7.]

Taajuusmuuttajissa elektrolyyttikondensaattorit sijaitsevat taajuusmuuttajan välipiirissä, joten niiden elvyttäminen suoritetaan syöttämällä tasajännitettä taajuusmuuttajan välipiirille B- ja B+ -liittimiin. Joissain tapauksissa taajuusmuuttajan riviliittimistä ei jarrukatkojasta johtuen löydy välipiirin B- tai B+ -liitintä, jolloin joudutaan menemään taajuusmuuttajan sisälle, mikä voi mahdollistaa virhekytkennän ja taajuusmuuttajan tuhoutumisen.

Taajuusmuuttajan sisällä olevien elektrolyyttikondensaattoreiden elvyttäminen ei eroa suuresti yksittäisten elektrolyyttikondensaattoreiden elvyttämisestä. Taajuusmuuttajalle syötettävät virrat voivat kuitenkin olla hieman suuremmat, sillä taajuusmuuttajan puhallin ja elektroniikka ottavat suurimman osan taajuusmuuttajalle syötettävästä virrasta. Lisäksi taajuusmuuttajia elvytettäessä on suositeltavaa, että taajuusmuuttajan välipiirille syötettävä jännite nostetaan rauhallisesti taajuusmuuttajan nimellisjännitteen tasolle, jotta virrat jännitteen kytkeytymishetkellä eivät kasva liian suuriksi.

5 Apulaitteen konseptin suunnittelu

Taajuusmuuttajan elektrolyyttikondensaattoreiden elvyttämiseen tarvittavan apulaitteen tarve tulee esille tarkasteltaessa nykyisiä ratkaisuja taajuusmuuttajan elvyttämiseen. Nykyisin taajuusmuuttajien elvyttämiseen käytetään kalliita DC-jännitelähteitä, eikä varsinaisesti elvyttämiseen tarkoitettua kaupallista tuotetta ole.

Perusajatuksena on, että apulaitteella voitaisiin korvata nykyiset elvytyksessä käytettävät kytkennät ja DC-jännitelähteet, toimivalla ja halvalla ratkaisulla. Ihannetilanteessa apulaite on suoraan sähköverkkoon kytkettävä laite, jolla taajuusmuuttajan elektrolyyttikondensaattoreiden elvyttäminen on turvallista ja nopeaa.

Apulaitteen tulisi olla mahdollisimman yksinkertainen ja halpa valmistaa, jonka johdosta se tulisi toteuttaa mahdollisimman vähillä komponenteilla. Komponentteja valittaessa täytyy huomioida myös komponenttien koko, jotta apulaite ei olisi liian suuri kuljetettavaksi. Tarkoituksena ei ole välttämättä kehittää uutta tekniikkaa taajuusmuuttajan välipiirin elektrolyyttikondensaattoreiden elvyttämiseen, vaan apulaitteessa voidaan soveltaa jo olemassa olevia kytkentöjä.

Apulaitteen tarkoituksena on toimia huoltomiehen työkaluna, jolloin se olisi osa asiakkaille tarjottavaa huoltopalvelua. Jokaisella huoltopiirillä olisi muutamia apulaitteita, joilla voitaisiin tarvittaessa käydä asiakkaan luona elvyttämässä taajuusmuuttajat. Tällöin asiakkaan ei tarvitsisi erikseen lähettää taajuusmuuttajia huoltoon. Halvan hinnan vuoksi myös pienemmillä huoltopiireillä olisi mahdollisuus hankkia itselleen taajuusmuuttajien elvytyslaite.

Apulaitteesta voitaisiin tehdä myös myytävä tuote, jolloin se ei olisi enää osana huoltopalvelua, vaan asiakas voisi tarvittaessa ostaa laitteen itselleen. Tällöin täytyisi kuitenkin miettiä, kuinka suuri kysyntä taajuusmuuttajan elvytyslaitteella olisi.

6 Elvyttämisratkaisuvaihtoehdot

Työssä tarkastellaan kahta erilaista ratkaisuvaihtoehtoa, joilla voidaan mahdollisesti toteuttaa elektrolyyttikondensaattoreita sisältävän taajuusmuuttajan elvyttäminen pitkän seisonjakson jälkeen. Ratkaisuvaihtoehdot ovat diodi-vastus-kytkentä ja säädettävä AC-jännitelähdetytkentä. Lisäksi säädettävällä DC-jännitelähteellä toteutettua elvyttämistä käytetään referenssinä muille ratkaisumenetelmille.

6.1 Säädettävä DC-jännitelähde

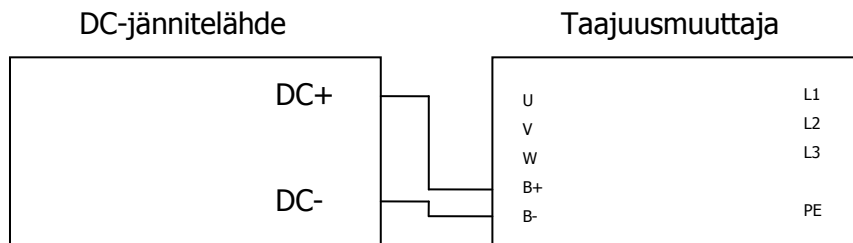
Säädettävällä DC-jännitelähteellä toteutettu taajuusmuuttajan elektrolyyttikondensattoreiden elvyttäminen on nykyään eniten käytetty elvyttämismenetelmä, sillä sen avulla taajuusmuuttaja saadaan elvytettyä turvallisesti ja erillisiä kytkentöjä ei tarvita.

DC-jännitelähteellä toteutetussa elvyttämisessä elvytettävän taajuusmuuttajan välipiirille syötetään tasajännitettä ja syöttövirtaa rajoitetaan. Kalleimmat DC-jännitelähteet sisältävät oman virranrajoituksen, jolla syöttövirta saadaan rajoitettua haluttuun arvoon. Mikäli DC-jännitelähde ei sisällä virranrajoitusta, voidaan syöttövirtaa rajoittaa myös ulkoisilla vastuksilla.

Elvytystapahtumassa syöttövirta rajoitetaan tyypillisesti noin 0,5–1 A:iin, jonka jälkeen taajuusmuuttajan välipiirille syötettävä tasajännite nostetaan vähitellen 565 V:iin, mikä vastaa taajuusmuuttajan välipiirin jännitettä normaalissa syöttötilanteessa. Taajuusmuuttajan puhallin ja elektroniikka heräävät, kun välipiirin jännite on noussut 200–400 V:iin, minkä jälkeen taajuusmuuttaja ottaa hetkellisesti huomattavasti enemmän virtaa. Elvyttämistä jatketaan 565 V:lla, kunnes laitteen elektrolyyttikondensattoreiden oksidikerrokset ovat korjaantuneet.

Oksidikerroksen korjaantumista on erittäin hankala arvioida, sillä pitkään jännitteettömänä olleiden elektrolyyttikondensattoreiden vuotovirta kasvaa ainoastaan muutamia mikroampeereja, jonka takia kokonaisvirran muutoksia elvytyksen aikana on mahdollista havaita. Elvytysajan pituuteen vaikuttaa kuitenkin, kuinka kauan taajuusmuuttaja on ollut jännitteettömänä.

DC-jännitelähde elvyttämistä käytetään tässä työssä referenssinä muille ratkaisuvaihtoehdoille, sillä se on menetelmä, jota käytetään nykyisinkin taajuusmuuttajien elvyttämiseen Konecranesin korjaamoilla. Kuvassa 12 esitetään kytkentäkaavio DC-jännitelähteellä toteutetusta elvyttämisestä:



Kuva 12. Kytkenäkaavio taajuusmuuttajan elvyttämisestä DC-jännitelähteellä

6.2 Diodi-vastus-kytkentä

Diodi-vastus-kytkennällä toteutettu taajuusmuuttajan elektrolyyttikondensaattoreiden elvyttäminen perustuu menetelmään, jossa taajuusmuuttajan välipiirille syötetään sähköverkosta tasasuunnattua jännitettä ja syöttövirtaa rajoitetaan vastuksilla. Menetelmän toimintaperiaate on sama kuin DC-jännitelähdetytkennässä.

Tässä työssä käytettävässä kytkennässä verkkojännitteestä tehdään halutun suuruista tasajännitettä elvytettävän laitteen välipiirille, muuntajia ja tasasuuntaajaa apuna käyttäen (ks. sähkökuvat kytkennästä, liite 1). Kytkentä koostuu kahdesta kolmivaihemuuntajasta, tasasuuntaajasta, kondensaattoreista ja vastuksista. Muuntajien muuntosuhdetta säätämällä saadaan tasasuuntaajalle syötettävän jännitteen suuruutta muutettua. Kytkennässä muuntajista saatava jännite voidaan valita 200 ja 525 V:n väliltä riippuen elvytettävän laitteen nimellisjännitteestä, tai mikäli elvyttäminen halutaan aloittaa nimellisjännitettä pienemmällä jännitteellä. Syöttövirran rajoittamiseen kytkennässä käytetään erikokoisia tehovastuksia, jotta taajuusmuuttajan välipiirin jännite ei kasva liian nopeasti, ja syöttövirta ei nouse liian suureksi missään kohdassa elvyttämistä.

Diodi-vastus-kytkennällä pyritään siihen, että taajuusmuuttajan elektrolyyttikondensaattorit voitaisiin elvyttää yhtä helposti ja turvallisesti kuin DC-jännitelähteellä, jolloin diodi-vastus-kytkennällä toteutetun apulaitteen hinnaksi tulisi ainoastaan muutamia

satoja euroja. Huonoja puolia kytkennässä on kuitenkin se, että syöttöjännitettä ei voida nostaa rauhassa ylös vaan, että jännitteeksi voidaan valita ainoastaan 200–525 V.

6.3 Säädetty AC-jännitelähdetyöntä

Säädettyä AC-jännitelähdetyöntä toteutettu elvyttäminen on täysin uusi ja innovatiivinen tapa mahdolliseen taajuusmuuttajan elvyttämiseen. Sen tarkoituksena on elvyttää välipiirin elektrolyyttikondensaattorit elvytettävän taajuusmuuttajan vaihtosuuntaajan nolladiodien kautta.

Säädettyä AC-jännitelähdetyöntä käytetään taajuusmuuttajaa ja siniaaltosuodatinta tuottamaan siniaalto jännitettä elvytettävän taajuusmuuttajan vaihtosuuntaajalle, jossa se tasasuunnataan nolladiodien kautta välipiirille. Syöttövirta kulkee elvytettävän taajuusmuuttajan vaihtosuuntaajan nolladiodien kautta, koska vaihtosuuntaajan IGB-transistoreita ei ohjata (ks. sähkökuvat säädetystä AC-jännitelähdetyöntä, liite 1).

Elvytyksessä käytetään taajuusmuuttajaa, jotta siniaaltosuodattimelle syötettävän PWM-signaalin jännitettä saadaan kasvatettua lineaarisesti. Taajuusmuuttajan parametrit on asetettu siten, että taajuusmuuttaja kiihdyttää rampia pitkin 60 sekunnissa maksimitaajuudelle 50 Hz:iin. Samaa aikaan taajuusmuuttajan ulostulojännite kasvaa nolasta voltista 400 V:iin. Taajuusmuuttajaan ohjaaminen tapahtuu digitaalisten sisääntulojen, DI1 ja DI3 kautta, joita ohjataan ulkoisella nappirasiolla. DI1 on suuntakäsky, jolloin taajuusmuuttaja ajaa minimitaajuudella ja DI3 on kiihdytyskäsky, jolloin taajuusmuuttaja kiihdyttää maksimitaajuuteen.

Säädettyä AC-jännitelähteellä pyritään siihen, että välipiirinjännite saadaan rampin avulla nostettua vähintään yhtä hallitusti, kuin DC-jännitelähteellä. Ainut ero on kuitenkin se, että AC-jännitelähteellä syöttöjännite saadaan nostettua automaattisesti. Hinnaltaan AC-jännitelähdetyöntä toteutettu apulaite tulisi olemaan paljon halvempi kuin DC-jännitelähte, sillä se tarvitsee toimiakseen ainoastaan taajuusmuuttajan ja siniaaltosuodattimen.

7 Elvyttämisratkaisuvaihtoehtojen testaaminen

Taajuusmuuttajan elvyttämiseen tarkoitettujen ratkaisuvaihtoehtojen testaamisen tarkoituksena on selvittää, kumpi ratkaisumalli sopii paremmin taajuusmuuttajan elvyttämiseen. Lisäksi tutkitaan, miten ratkaisuvaihtoehdot eroavat nykyään käytössä olevasta DC-jännitelähteellä toteutetusta taajuusmuuttajan elvyttämisestä.

7.1 Testitulokset

Testaaminen suoritettiin Riihimäen Konecranes Finland Oy:n korjaamolla, jonne taajuusmuuttajien huolto on Suomessa keskitetty. Ratkaisumallit sijoitettiin testilaatikkoon, jossa niiden testaaminen oli mahdollisimman turvallista (ks. kuvat testilaatikosta ja testijärjestelyistä, liite 2).

Mittauksissa käytettiin seuraavia mittalaitteita:

- Hioki 8841 Memory HiCORDER muistipiirturi, mittausdatan keräämiseksi
- Hioki virtapihti (0.1V/A), syöttövirran mittaamiseksi
- Hioki 3272 jännitelähde, Hiokin virtapihdin jännitelähteenä
- Testec-jännitemittapää (1:20/1:200, 25MHz), välipiirin jännitteen ja syöttöjännitteen mittaamiseksi

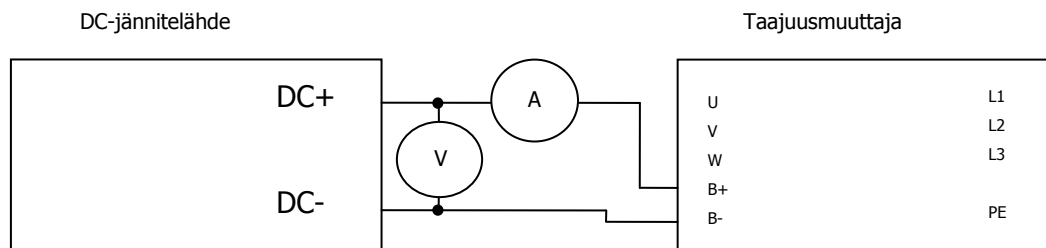
7.1.1 Säädetty DC-jännitelähde

DC-jännitelähde mittauksien tarkoituksena oli tutkia taajuusmuuttajan hallittua käynnistämistä. Taajuusmuuttajan hallittu käynnistäminen vastaa täysin tilannetta, miten pitkään jännitteettömänä ollut taajuusmuuttaja tulisi ottaa käyttöön. Mittauksissa tutkittiin, miten välipiirin jännite ja syöttövirta muuttuvat taajuusmuuttajan käynnistymisen aikana. Lisäksi toisessa mittauksessa elvytettiin 2,5 vuotta jännitteettömänä ollut taajuusmuuttaja. Kyseisen mittauksen tarkoituksena oli selvittää, voidaanko elektrolyytikondensaattoreiden oksidikerrosten korjaantumista havaita.

Mittaus 1 - taajuusmuuttajan hallittu käynnistäminen

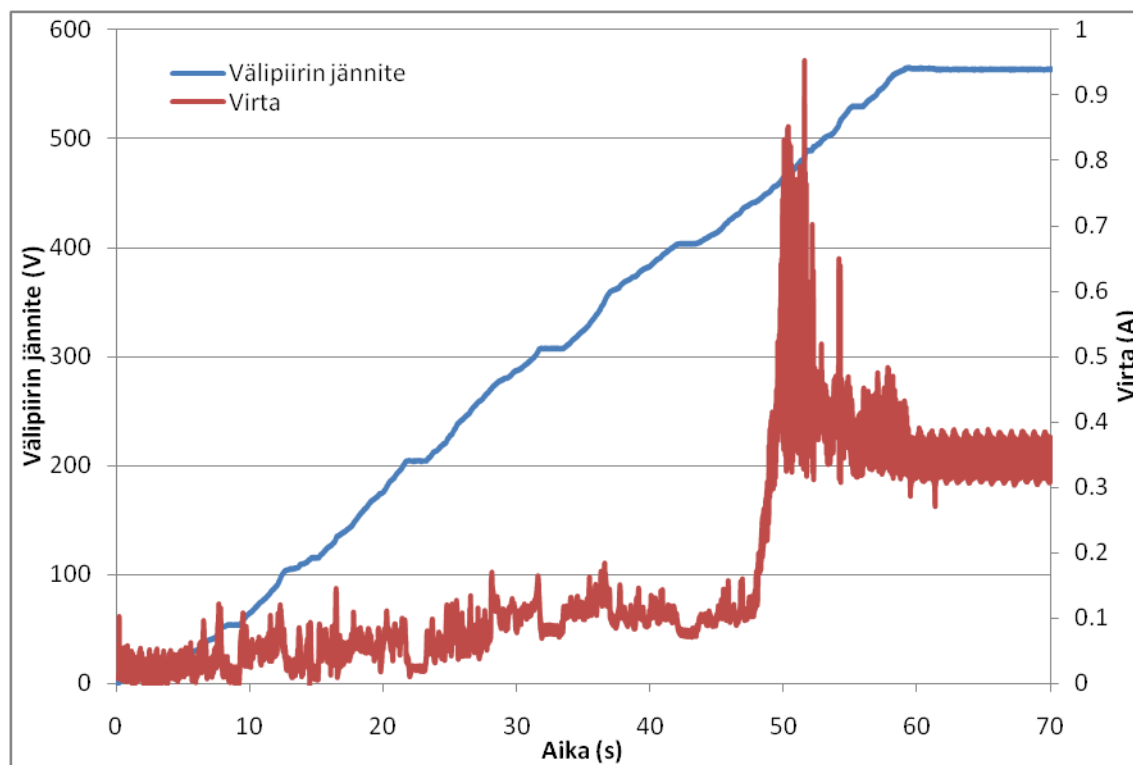
Mittauksessa DC-jännitelähteen virtaraja asetettiin yhteen ampeeriin, minkä jälkeen taajuusmuuttajan välipiirille napoihin B- ja B+ syötettiin tasajännitettä. Syötettävä tasajännite nostettiin rauhallisesti 565 V:iin siten, että syöttövirta ei missään vaiheessa noussut yhden ampeerin virtarajaa vasten. Mittauksissa käytettiin jo elvytettyä taajuusmuuttajaa.

Syöttövirtaa ja taajuusmuuttajan välipiirin jännitettä mitattiin käynnistytksen aikana. Mittauksissa käytettiin Testec-jännitemittapäätä ja Hiokin virtapihtiä. Mittausdata puolestaan kerättiin Hiokin muistipiirturilla, jonka näytteenottotaajuus asetettiin 10 kHz:iin. Mittapisteen mittauksesta esitetään kuvassa 13. Välipiirin jännite (V) ja syöttövirta (A). Välipiirin jännite mitattiin taajuusmuuttajan B- ja B+ -liittimistä. Syöttövirta mitattiin puolestaan B+ liittimen johdosta.



Kuva 13. DC-jännitelähde mittauksen mittapisteen

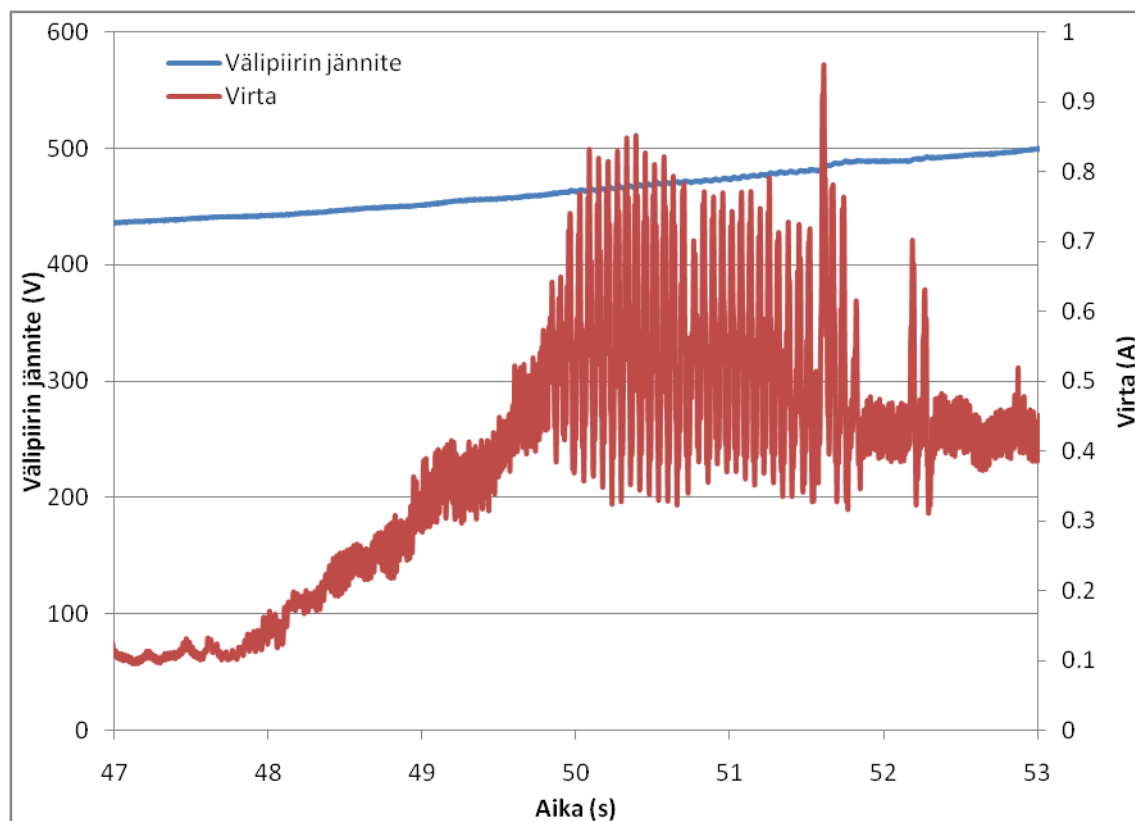
Kuvassa 14 (ks. seur. s.) esitetään tulokset mittauksesta. Mittaustuloksista havaitaan, että välipiirinjännite nostettiin 565 V:iin noin 60 sekunnissa. Taajuusmuuttajan käynnistymisen aikana syöttövirta ei missään vaiheessa noussut yhden ampeerin virtarajaa vasten, mikä olisi voinut elvytystilanteessa vahingoittaa välipiirin elektrolyyttikondensattoreita.



Kuva 14. Taajuusmuuttajan hallittu käynnistäminen DC-jännitelähteellä

Syöttövirrasta havaittiin, että se on muodoltaan hieman piikikästä. Tämä johtuu siitä, että syöttövirta kasvoi hetkellisesti aina, kun taajuusmuuttajan välipiirille syötettävä jännite kasvoi. Tästä syystä pitkään jännitteettömänä ollut taajuusmuuttaja voi tuhoutua, jos se kytketään suoraan verkkojännitteeseen, jolloin vuotovirrat elektrolyyttikondensaattoreiden sisällä voivat kasvaa liian suuriksi.

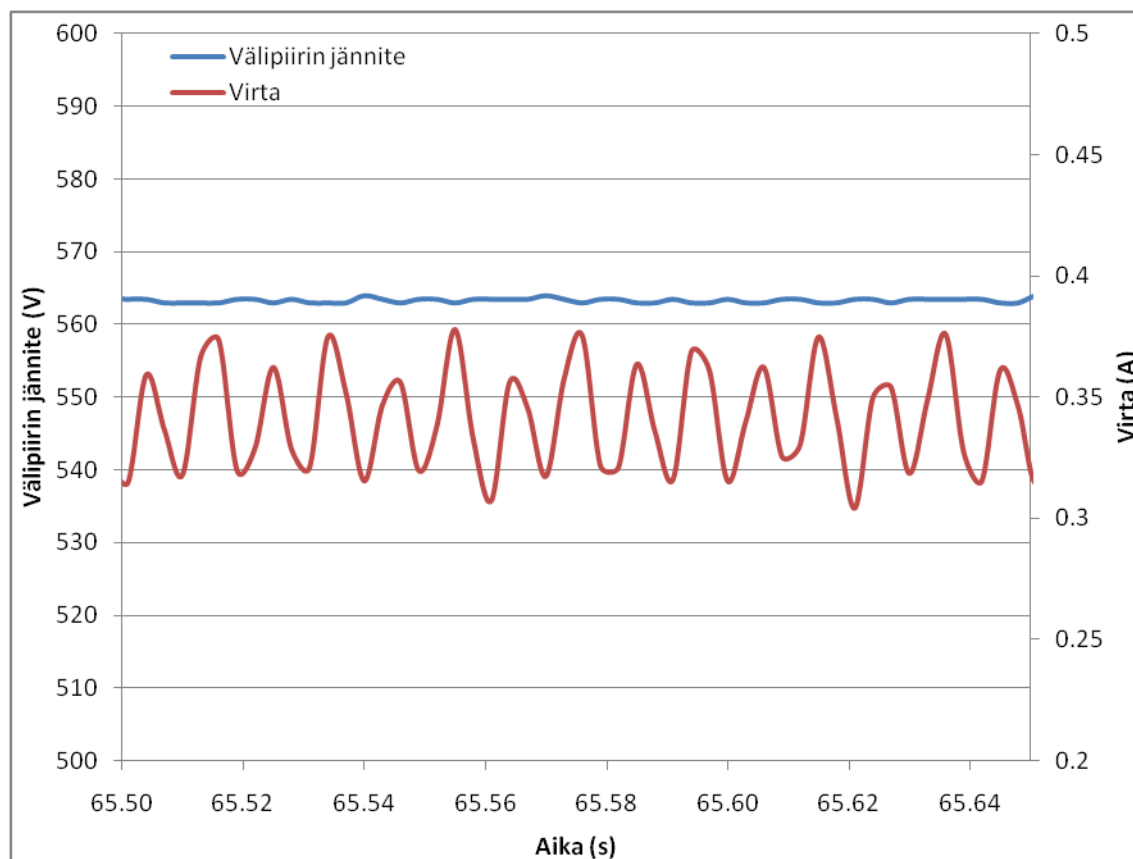
Taajuusmuuttajan käynnistymisen aikana, noin 47 sekunnin kohdalla syöttövirta kasvoi äkillisesti, mikä puolestaan johtui taajuusmuuttajan elektroniikan ja puhaltimen käynnistymisestä. Elektroniikan ja puhaltimen käynnistyshetki esitetään tarkemmin kuvassa 15 (ks. seur. s.).



Kuva 15. Elektroniikan ja puhaltimen heräämishetki DC-jännitelähteellä

Elektroniikan ja puhaltimen käynnistymishetkellä syöttövirta nousi noin 100 mA:sta muutamissa sekunneissa 500 mA:iin, jonka jälkeen virtapiikit kävivät jopa 800 mA:ssa. Taajuusmuuttajan syöttövirran äkillinen kasvu ei kuitenkaan vaikuta elektrolyyttikondensaattoreiden toimintaa, sillä ne eivät ota yhtään enempää virtaa. Elektroniikan ja puhaltimen käynnistyttyä syöttövirta laski noin 400 mA:iin.

Taajuusmuuttajan syöttövirta vakiintui lopulliseen arvoon, kun syöttöjännite oli nostettu 565 V:iin. Välipiirinjännite ja syöttövirta taajuusmuuttajan käynnistymisen jälkeen esitetään kuvassa 16 (ks. seur. s.).



Kuva 16. Välipiirinjännite ja syöttövirta DC-jännitelähde käynnistämässä

Kuvassa välipiirin jännite nostettiin 565 V:iin, ja syöttövirta asettui noin 350 mA:iin. Syöttövirran muodosta havaitaan, että syöttövirta ei ole aivan tasaista vaan se aaltoilee noin 300–370 mA:n välillä. Tämä johtuu siitä, että jostain syystä DC-jännitelähteen ulostulojännite ei ollut täysin tasaista.

Mittaustulokset todistavat, että DC-jännitelähde on toimiva vaihtoehto pitkään seisonnassa olevan taajuusmuuttajan välipiirin elektrolyyttikondensaattoreiden elvyttämiseen. DC-jännitelähteellä taajuusmuuttajan välipiirin jännite saadaan nostettua hallitusti 565 V:iin, ja syöttövirta voidaan rajoittaa haluttuun arvoon. Tällöin välipiirin elektrolyyttikondensaattoreiden läpi ei pääse kulkemaan liian suuria virtoja, jotka voisivat aiheuttaa niiden tuhoutumisen.

Mittaus 2 - taajuusmuuttajan elvyttäminen

Toisen mittauksen tarkoituksena oli elvyttää 2,5 vuotta jännitteettömänä ollut taajuusmuuttaja. Elvytettävänä ollut taajuusmuuttaja oli täysin samaa merkkiä ja teholuokkaa kuin ensimmäisessä mittauksessa käytetty taajuusmuuttaja. Mittauksessa pyrittiin selvittämään, voidaanko välipiirin jännitteestä tai syöttövirrasta havaita, milloin taajuusmuuttajan välipiirin elektrolyyttikondensaattoreiden oksidikerrokset ovat korjaantuneet.

Mittauksessa välipiirin jännite nostettiin täysin samalla tavalla kuin ensimmäisessä mittauksessa 565 V:iin, jonka jälkeen elvyttämistä jatkettiin 1,5 tuntia. Elvytettävän taajuusmuuttajan välipiirin jännitteessä ja syöttövirrassa ei kuitenkaan havaittu minkäänlaisia muutoksia elvyttämisen aikana. Tämä selittyy pitkälti elektrolyyttikondensaattorin teorialla, sillä taajuusmuuttajan ollessa pitkään jännitteettömänä, sen elektrolyyttikondensaattoreiden vuotovirta kasvaa ainoastaan muutamia mikroampeereja. Tästä syystä satojen milliampeerien kokonaisvirrasta, on mahdotonta nähdä muutamien mikroampeerien muutoksia.

Mittausten perusteella taajuusmuuttajan välipiirin elektrolyyttikondensaattoreiden oksidikerroksen korjaantumista elvytyksen aikana on lähes mahdoton havaita. Tapahtuman havaitsemiseksi täytyisi elektrolyyttikondensaattoreille kulkevaa virtaa mitata taajuusmuuttajan sisältä. Lisäksi mittauksissa pitäisi käyttää mikroampeerimittaria, jotta muutokset virrassa voitaisiin havaita.

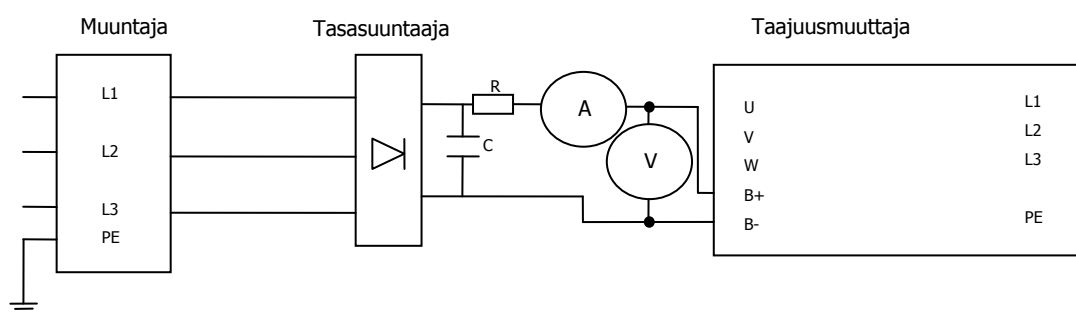
7.1.2 Diodi-vastus-kytkentä

Diodi-vastus-kytkentämittauksien tarkoituksena oli verrata, miten diodi-vastuskytkennällä toteutettu taajuusmuuttajan käynnistäminen eroaa DC-jännitelähteellä toteutetusta käynnistämisestä. Mittauksissa tutkittiin, miten välipiirin jännite ja syöttövirta muuttuvat taajuusmuuttajan käynnistyksen aikana.

Mittaus 1 - taajuusmuuttajan käynnistäminen

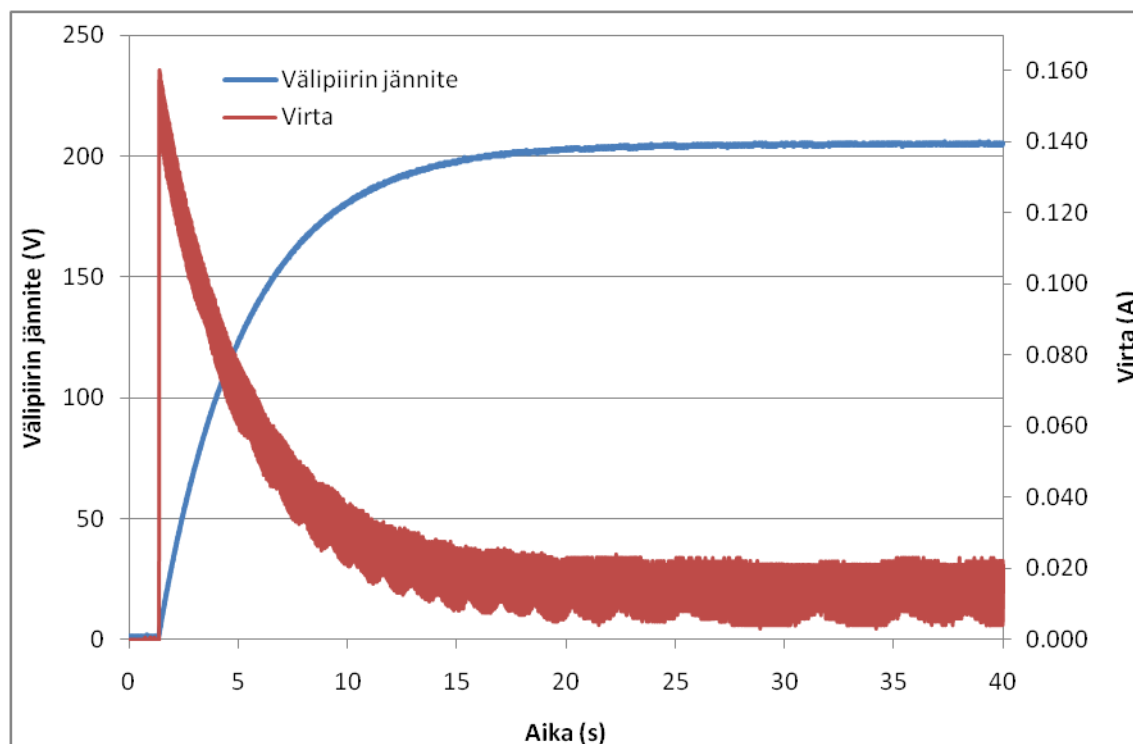
Diodi-vastus-kytkentämittauksessa taajuusmuuttajan välipiirille napoihin B- ja B+ syötettiin tasajännitettä diodi-vastus-kytkennän kautta. Mittauksissa käytettiin samaa taajuusmuuttajaa, kuin DC-jännitelähde mittauksissa.

Syöttövirtaa ja taajuusmuuttajan välipiirin jännitettä mitattiin käynnistyksen aikana. Mittauksissa käytettiin samoja mittalaitteita kuin DC-jännitelähde mittauksissa. Mittapisteet mittauksesta esitetään kuvassa 17. Välipiirin jännite (V) ja syöttövirta (A). Välipiirin jännite mitattiin taajuusmuuttajan B- ja B+ -liittimistä. Syöttövirta puolestaan mitattiin B+ liittimen johdosta.



Kuva 17. Diodi-vastus-kytkennän mittapisteet

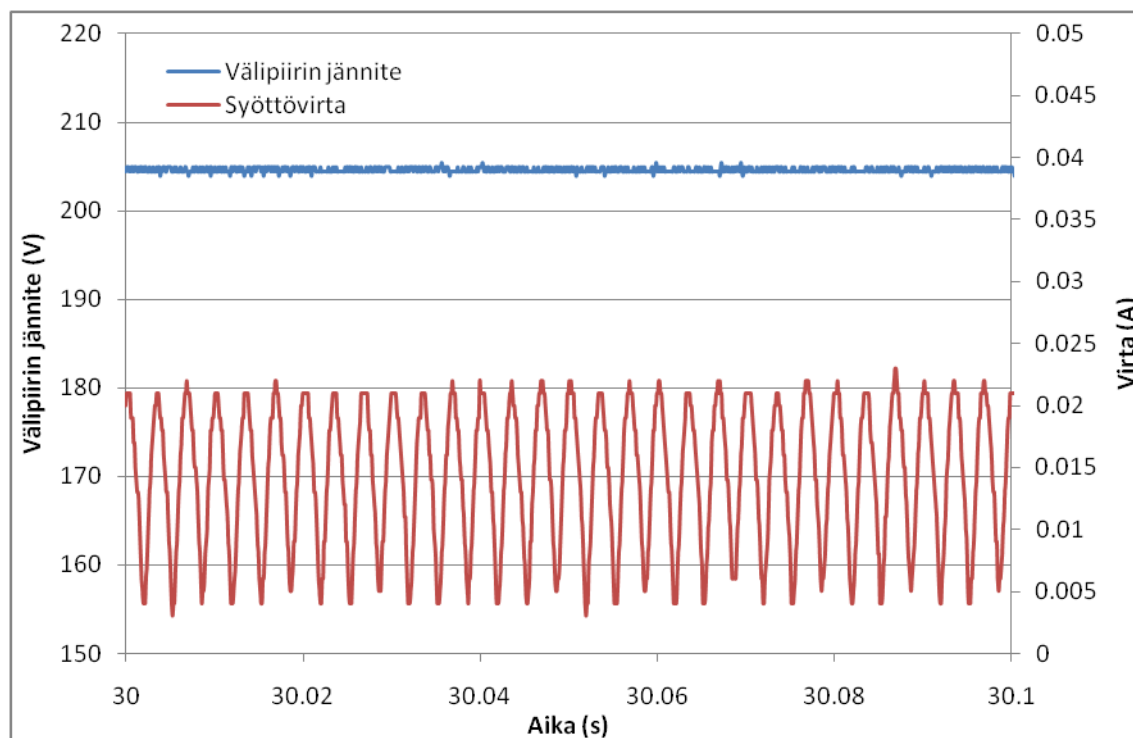
Mittaukset aloitettiin syöttämällä taajuusmuuttajan välipiirille 220 V:n jännitettä ja syöttövirtaa rajoitettiin vastuksella. Tuloksista havaittiin, että syöttövirta nousi jännitteen kytketymishetkellä välittömästi 700 mA:iin ja välipiirin jännite puolestaan noin 7 sekunnissa 220 V:iin. Tämä johtui siitä, että välipiirin elektrolyyttikondensaattoreiden virta määräytyy kapasitanssin ja jännitteen muutosnopeuden tulona, jolloin jännitteen kytkeminen varauksettomaan kondensaattoriin aiheuttaa äärettömän suuren hetkellisen virran. Kyseisen ilmiön takia kytkentää jouduttiin muuttamaan niin, että taajuusmuuttajalle syötettävä tasajännite laskettiin 205 V:iin ja virranrajoitusvastuksen resistanssia kasvatettiin. Tulokset kyseisestä mittauksesta esitetään kuvassa 18 (ks. seur. s.).



Kuva 18. Taajuusmuuttajan käynnistäminen diodi-vastus-kytkennällä

Mittaustuloksista havaittiin, että jännitteen kytkeytymishetkellä syöttövirta kasvoi välittömästi noin 160 mA:iin. Välipiirin jännite puolestaan nousi 205 V:iin noin 25 sekunnissa. Välipiirin jännite ei kuitenkaan ollut riittävän suuri käynnistämään taajuusmuuttajan elektroniikkaa tai puhallinta.

Taajuusmuuttajan välipiirin jännitteen noustessa 205 V:iin, syöttövirta putosi ja vakiintui lopulliseen arvoonsa. Kuvassa 19 esitetään taajuusmuuttajan syöttövirran muoto, kun taajuusmuuttajan välipiirin jännite on vakiintunut 205 V:iin.



Kuva 19. Syöttövirran muoto diodi-vastus-kytkennällä

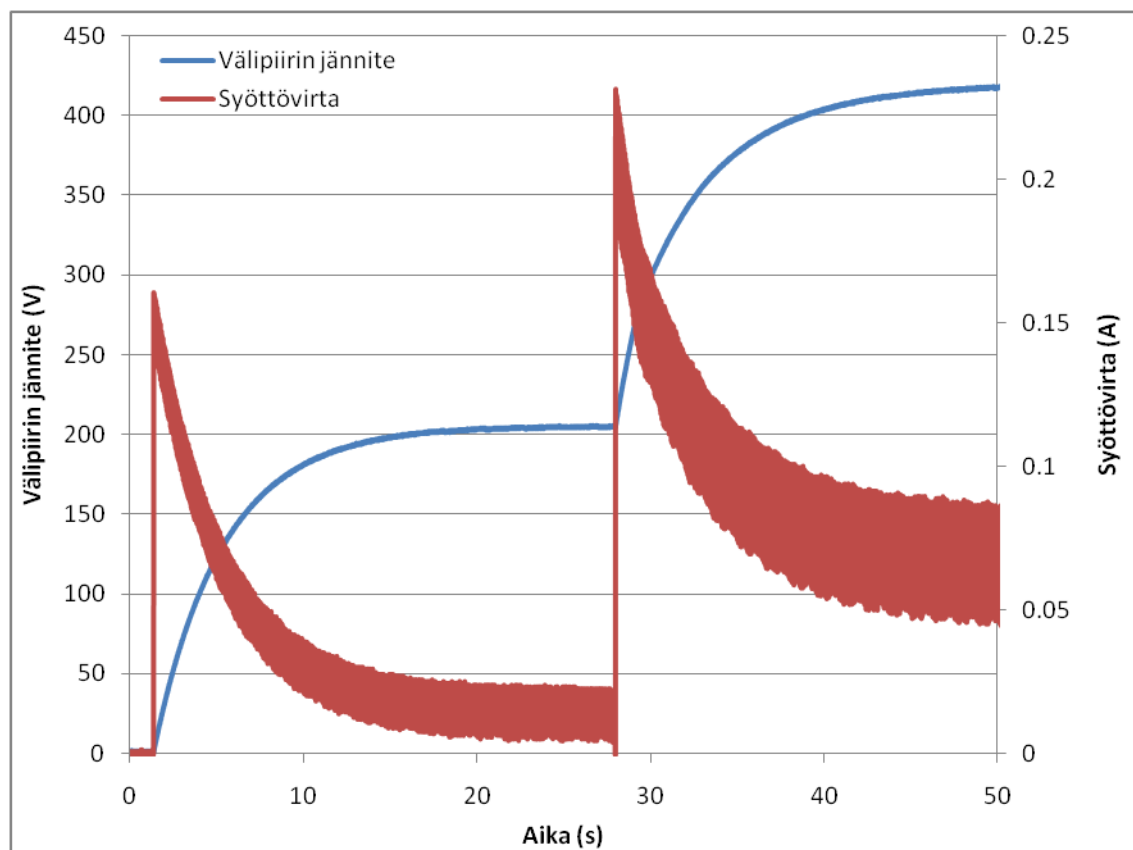
Syöttövirran muodosta havaittiin, että taajuusmuuttajalle syötettävä tasavirta ei ollut täysin tasaista, vaan sen arvo vaihteli 5–20 mA:n välillä. Tämä johtui siitä, että tasasuuntaajalta tuleva tasajännite oli hieman sykkeistä.

Mittaustuloksista havaittiin, että diodi-vastus-kytkennällä toteutetussa taajuusmuuttajan hallitussa käynnistämässä taajuusmuuttajan syöttövirtaa täytyy rajoittaa suurilla vastuksilla, jotta jännitteen kytkeytymishetken virrat eivät nouse liian suuriksi. Suurella virranrajoitusvastuksella myös välipiirin jännite saadaan nostettua hallitusti. Testien perusteella voidaan sanoa, että kyseistä menetelmää voitaisiin käyttää taajuusmuuttajan elvyttämiseen. Tällöin olisi kuitenkin tärkeää selvittää, kuinka kauan elvyttämistä täytyy jatkaa 205 V:n jännitteellä ennen kuin välipiirin elektrolyyttikondensaattoreiden oksidikerrokset olisivat korjaantuneet.

Mittaus 2 - taajuusmuuttajan käynnistäminen

Toisen mittauksen tarkoituksena oli pyrkiä käynnistämään taajuusmuuttaja yhtä hallitusti kuin DC-jännitelähteellä. Mittaus aloitettiin syöttämällä taajuusmuuttajan välipiirille 205 V:n tasajännitettä, jonka virtaa rajoitettiin vastuksella. Välipiirin jännitteen

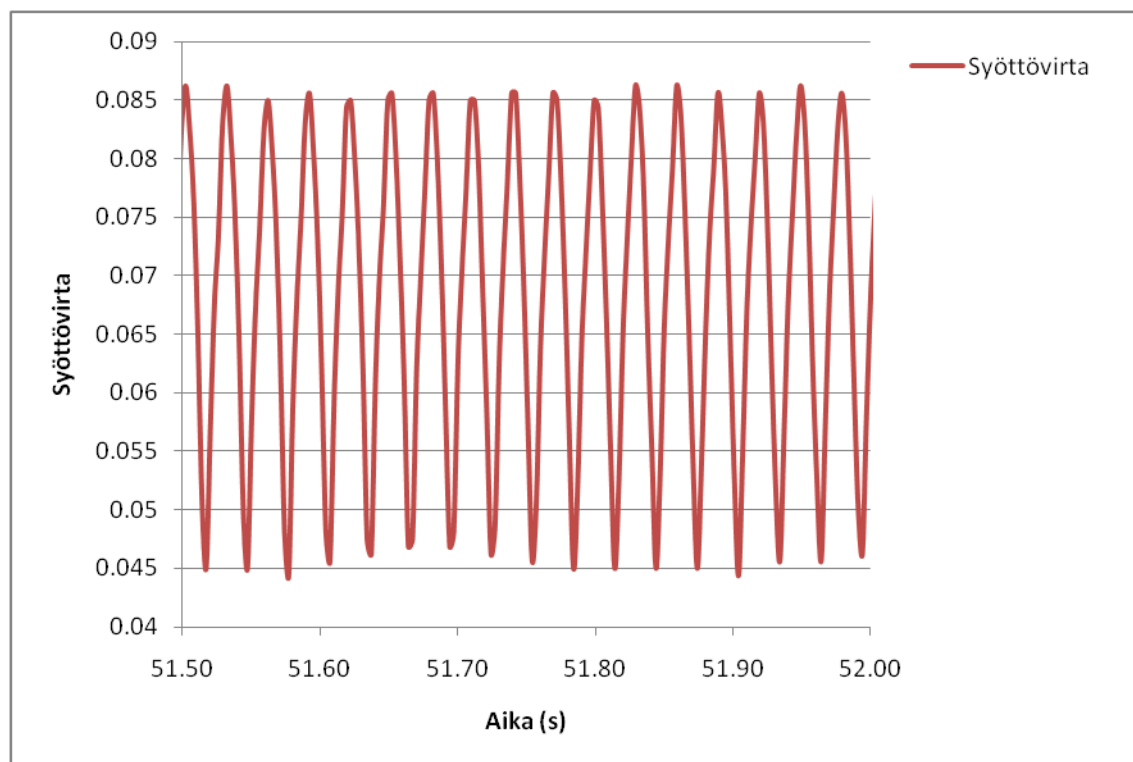
noustessa 205 V:iin, jatkettiin taajuusmuuttajan käynnistämistä kytkemällä diodi-vastus-kytkennästä 420 V taajuusmuuttajan välipiirille. Käynnistystapahtuma esitetään kuvassa 20:



Kuva 20. Taajuusmuuttajan käynnistäminen diodi-vastus-kytkennällä

Tuloksista havaittiin, että välipiirin jännite nousi 420 V:iin noin 50 sekunnissa. Molemmilla jännitteen kytketymishetkillä syöttövirta kasvoi kondensaattorin teorian mukaisesti. Ensimmäiseksi taajuusmuuttajan välipiirille kytkettiin 220 V, jolloin syöttövirta nousi äkillisesti noin 160 mA:iin. Tämän jälkeen taajuusmuuttajan välipiirille kytkettiin 420 V, jolloin syöttövirta nousi noin 230 mA:iin. Käynnistämisen aikana taajuusmuuttajan puhallin ei jostain syystä käynnistynyt.

Taajuusmuuttajan välipiirin jännitteen noustessa 420 V:iin, välipiirin kondensaattorit varautuivat täyteen jolloin, syöttövirta putosi eksponentiaalisesti ja vakiintui lopulliseen arvoonsa. Kuvassa 21 (ks. seur. s.) esitetään syöttövirran muoto, välipiirin jännitteen ollessa 420 V. Syöttövirta on muodoltaan hieman sykkeistä ja sen arvo vaihtelee 45–85 mA välillä.



Kuva 21. Syöttövirta diodi-vastus-kytkennällä

Mittaustulosten perusteella voidaan todeta, että taajuusmuuttajan käynnistäminen diodi-vastus-kytkennällä ei ole yhtä hallittua kuin DC-jännitelähteellä, sillä välipiirin jännitteen nousu ei ole yhtä hallittua. Myös jännitteen kytkeytymishetkillä syöttövirta kasvaa äkillisesti. Lisäksi tuloksista havaittiin, että taajuusmuuttajan puhallin ei jostain syystä herää käynnistämisen aikana.

Voidaan kuitenkin olettaa, että tarpeeksi suurilla virranrajoitusvastuksilla taajuusmuuttajan elvyttäminen diodi-vastus-kytkennällä on mahdollista. Tällöin välipiirin jännite saadaan nostettua tarpeeksi rauhallisesti, eikä syöttövirran piikit kasva liian suuriksi jännitteen kytkeytymishetkillä. Menetelmä vaatii kuitenkin lisätutkimuksia, ennen kuin sitä voidaan käyttää taajuusmuuttajan elvyttämiseen.

7.1.3 Säädetty AC-jännitelähdetyöntä

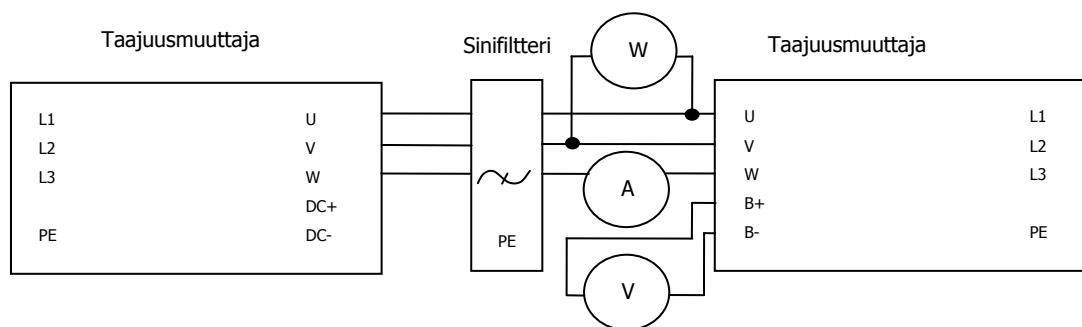
Säädettävän AC-jännitelähdetyöntä mittauksien tarkoituksena oli verrata, miten AC-jännitelähdetyöntä toteutettu taajuusmuuttajan käynnistäminen eroaa DC-jännitelähteellä toteutetusta taajuusmuuttajan käynnistamisestä. Tarkoituksena oli

selvittää, onko AC-jännitelähteellä toteutettu taajuusmuuttajan käynnistäminen yhtä hallittua kuin DC-jännitelähteellä. Mittauksissa tutkittiin, miten välipiirin jännite, syöttövirta ja -jännite muuttuvat taajuusmuuttajan käynnistymisen aikana.

Mittaus 1 - taajuusmuuttajan käynnistäminen

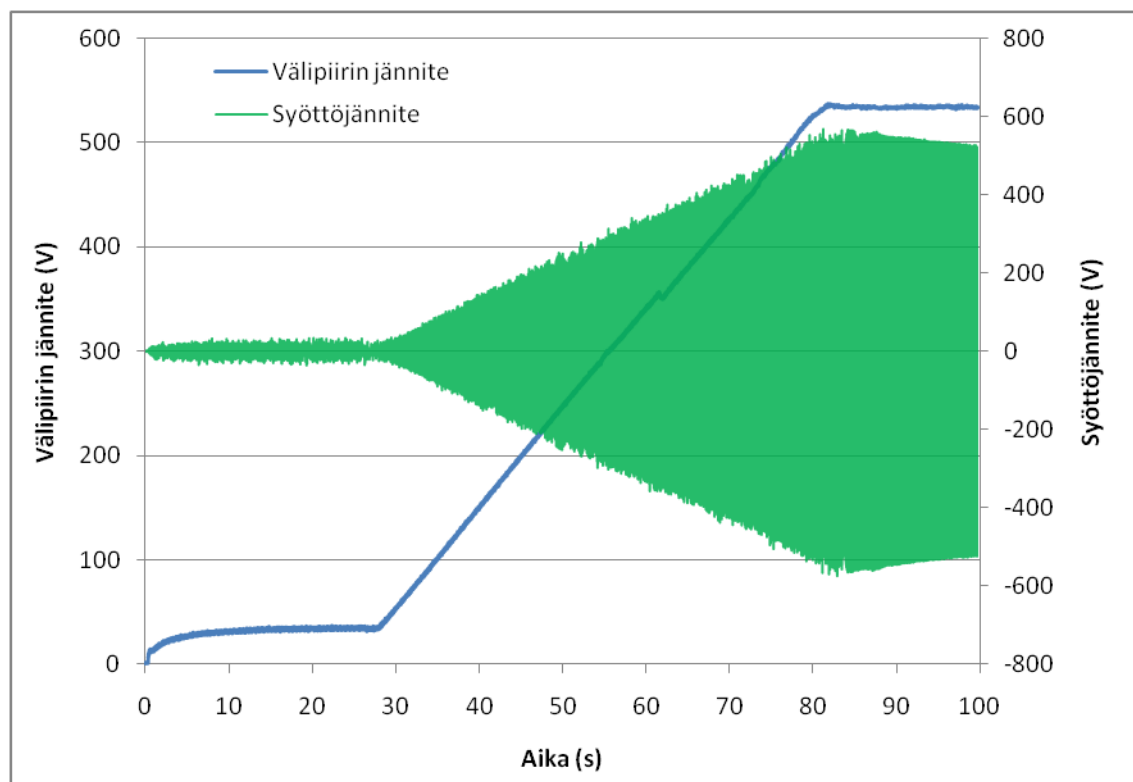
Mittauksessa AC-jännitelähdekytkennässä käytetyn taajuusmuuttajan parametrit asetettiin elvytykseen sopiviksi, jonka jälkeen käynnistettävän taajuusmuuttajan vaihtosuuntaajalle, moottoriliittimiin U, V ja W syötettiin sinimuotoista jännitettä AC-jännitelähdekytkennällä. Syöttöjännite nostettiin lineaarisesti 400 V:iin 60 sekunnin rampilla. Mittauksissa käytettiin samaa taajuusmuuttajaa kuin DC-jännitelähde ja diodivastus-kytkentämittauksissa, jotta mittaustulokset olisivat keskenään vertailukelpoisia.

Taajuusmuuttajan käynnistytksen aikana mitattiin välipiirin jännitettä, syöttövirtaa ja syöttöjännitettä. Mittauksissa käytettiin samoja mittalaitteita kuin DC-jännitelähteellä tehdyissä mittauksissa. Lisäksi syöttöjännite mitattiin Testec-jännitemittapäällä. Kuvassa 22 esitetään mittapisteet mittaukselle. Välipiirin jännite (V), syöttöjännite (W) ja syöttövirta (A). Välipiirin jännite mitattiin taajuusmuuttajan navoista B+ ja B- ja syöttöjännite mitattiin moottoriliittimiltä vaiheiden U ja V välistä. Syöttövirta puolestaan mitattiin moottoriliittimen U-vaiheesta (kuvassa W-vaiheesta).



Kuva 22. Säädetävän AC-jännitelähdekytkennän mittapisteet

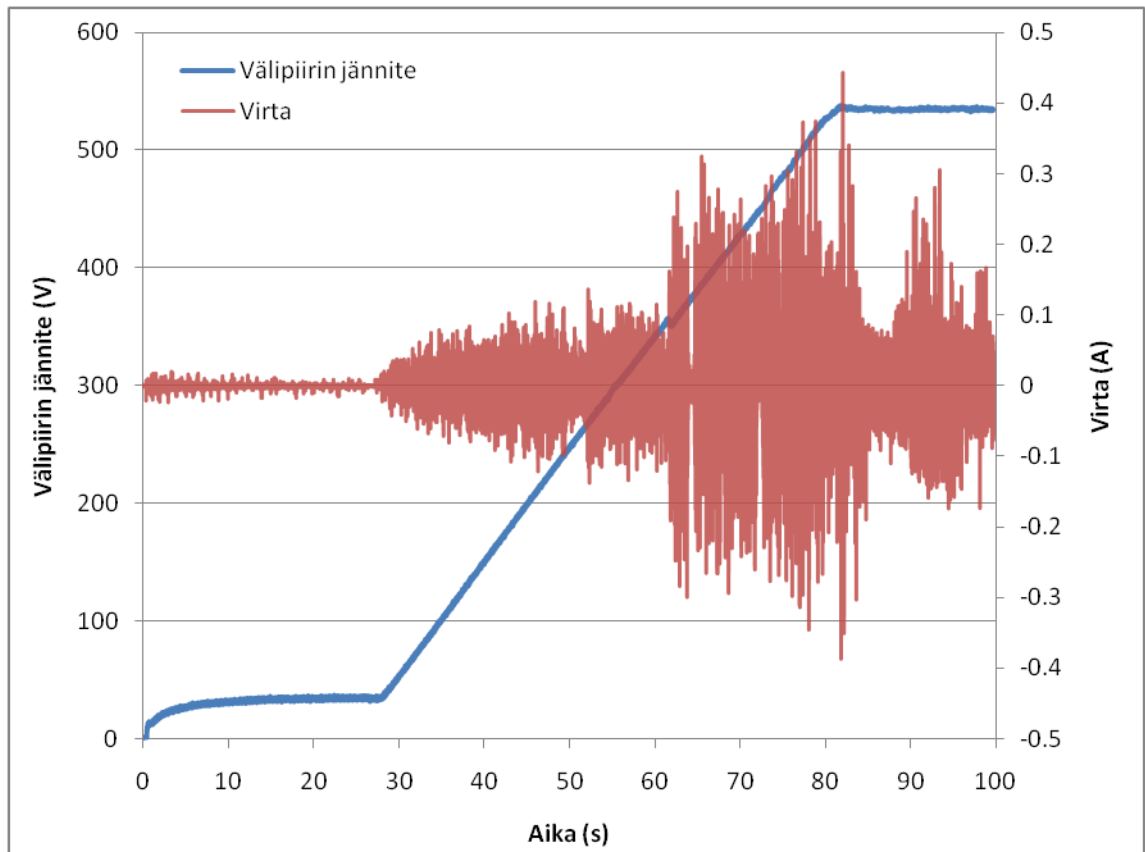
Mittaustuloksista havaitaan, että taajuusmuuttajan vaihtosuuntaajalle syötettävä syöttöjännite nousi nolasta voltista 400 V:iin todella hallitusti. Myös välipiirin jännite kasvoi hallitusti syöttöjännitteen kasvaessa. Mittaustulokset välipiirin jännitteestä ja syöttöjännitteestä esitetään kuvassa 23. (ks. seur. s.).



Kuva 23. Taajuusmuuttajan käynnistäminen säädettävällä AC-jännitelähdetyksellä

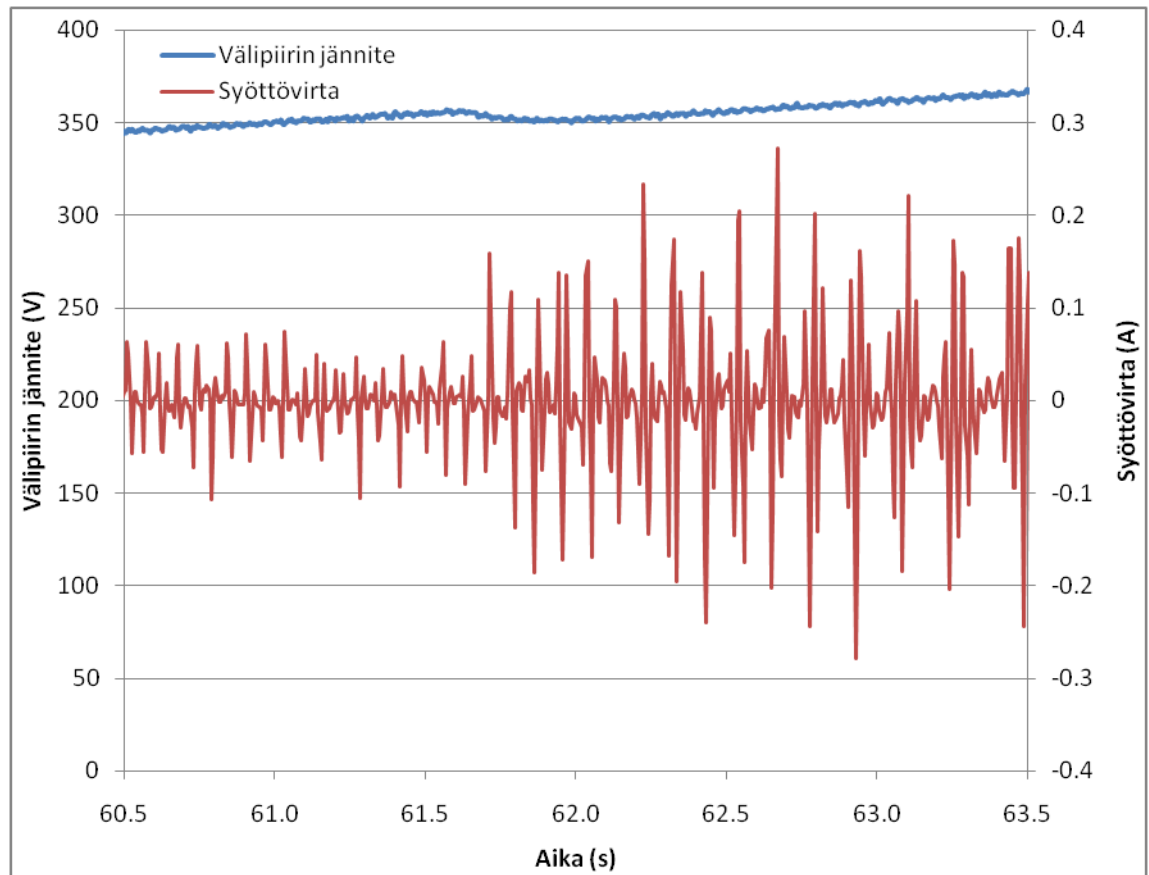
Kuvasta havaittiin, että taajuusmuuttajan elvyttäminen aloitettiin varovasti asettamalla kytkennästä pelkästään suuntakäsky päälle, jolloin taajuusmuuttajalle syötettiin jännitettä yhden hertsin minimitaajuudella. Tämän jälkeen välipiirin jännite kasvoi 10 sekunnissa hieman. Seuraavaksi 30 sekunnin kohdalla, asetettiin kytkennästä kiihdytyskäsky päälle, jonka jälkeen syöttöjännite kasvoi ramppia pitkin 400 V:iin noin 50 sekunnissa. Koko käynnistystapahtuman pituus oli noin 80 sekuntia. Todellisuudessa rampin pituus oli kuitenkin 60 sekuntia, sillä jos suunta- ja kiihdytyskäsky olisi asetettu päälle samaan aikaan, olisi syöttöjännite noussut nolasta voltista 400 V:iin 60 sekunnissa.

Kuvasta 23 voitiin havaita myös, että noin 60 sekunnin kohdalla välipiirin jännite hieman notkahti. Tapahtuma havaitaan paremmin kuvasta 24 (ks. seur. s.), jossa esitetään välipiirin jännite ja syöttövirta taajuusmuuttajan käynnistymisen aikana.



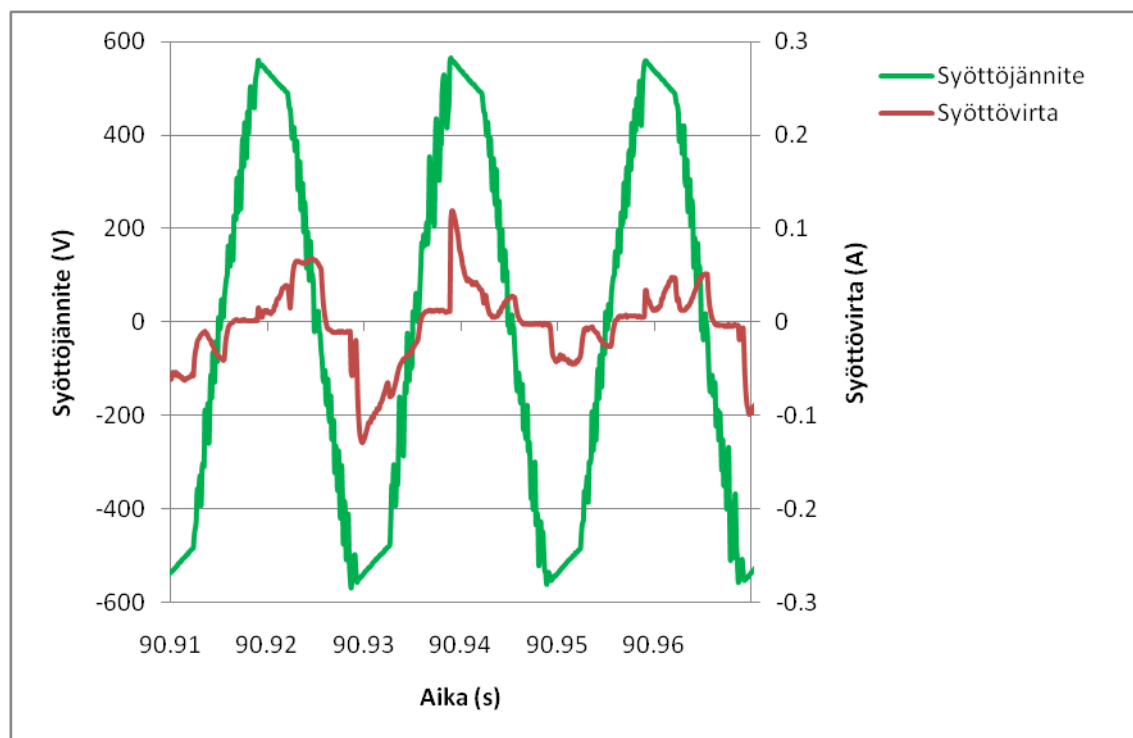
Kuva 24. Syöttövirta ja välipiirin jännite AC-jännitelähdekytkennällä

Kuvasta 24 havaittiin, että syöttövirta kasvoi hallitusti, kunnes noin 60 sekunnin kohdalla se kasvoi äkillisesti. Samaan aikaan myös välipiirin jännite notkahti hieman. Tämä johtuu elektroniikan ja puhaltimen käynnistymisestä, aivan kuten DC-jännitelähde mittauksissakin. Kuvassa 25 (ks. seur. s.) kuvataan tarkemmin elektroniikan ja puhaltimen käynnistymishetki.



Kuva 25. Puhaltimen ja elektronikan heräämishetki säädettävällä AC-jännitelähteellä

Kuvasta 25 havaittiin, että 61,5 ja 62 sekunnin välillä taajuusmuuttajan välipiirin nousu hieman pysähtyi, ja syöttövirta puolestaan kasvoi hieman. Kuvasta virran todellista muotoa ei vielä pysty hahmottamaan. Seuraavassa kuvassa 26 (ks. seur. s.) esitetään syöttöjännitteen ja -virran muodot huippuarvoina, kun syöttöjännite on nostettu 400 V:iin ja välipiirin jännite on asettunut 525 V:iin.



Kuva 26. Syöttöjännite ja -virta säädettävällä AC-jännitelähdetyksellä

Kuvassa 26 on esitetty syöttöjännite ja -virta huipusta huippuun. Kuvasta havaittiin, että siniaaltosuodattimen tuottama siniaalto jännite ei ole muodoltaan täysin puhdasta siniaaltoja. Mittauksissa syöttöjännite mitattiin kahden vaiheen väliltä, ja syöttövirta mitattiin yhdestä vaiheesta.

Nykyisten mittaustulosten perusteella voidaan todeta, että AC-jännitelähdetyksentä on toimiva vaihtoehto pitkään jännitteettömänä olleen taajuusmuuttajan välipiirin elektrolyyttikondensaattoreiden elvyttämiseen. Taajuusmuuttajan välipiirin jännitteen nousun perusteella voidaan todeta, että taajuusmuuttajan käynnistäminen on vähintään yhtä hallittua kuin DC-jännitelähteellä. Myös syöttöjännitteen ja -virran kasvu on hallittua. Menetelmä vaatii kuitenkin lisätestaamista ennen kuin sitä voidaan käyttää taajuusmuuttajan elvyttämiseen.

7.2 Testitulosten yhteenveto

Ratkaisuvaihtoehtojen testaamisen yhteenvetona voidaan todeta, että molemmilla ratkaisuvaihtoehtoilla taajuusmuuttajan välipiirin elektrolyyttikondensaattoreiden elvyttäminen on mahdollista. Teknillisesti säädettävä AC-jännitelähdetyöntä osoittautui todella potentiaalisesti menetelmäksi, sillä sen avulla taajuusmuuttajan välipiirin jännite saadaan nostettua todella hallitusti. Lisäksi syöttöjännitteen rampin pituutta voidaan säätää taajuusmuuttajan parametreista, jonka takia elvyttäminen voidaan tehdä automaattisesti toisin kuin DC-jännitelähteellä, jossa syöttöjännite täytyy nostaa käsin.

Diodi-vastus-kytkentä puolestaan on erittäin hyvä tapa taajuusmuuttajan elvyttämiseen, jos taajuusmuuttajan välipiirin elektrolyyttikondensaattorit elvytetään nimellisjännitettä pienemmällä jännitteellä. Tällöin elvytysjännite saataisiin tasasuunnattua suoraan verkkojännitteestä, eikä erillisiä muuntajia tarvittaisi.

Kaupallisten näkökulmien perusteella molemmat ratkaisuvaihtoehdot sopivat taajuusmuuttajan elvyttämiseen tarvittavaksi apulaitteeksi, sillä kummatkin ratkaisuvaihtoehdot on toteutettu vain muutamilla komponenteilla. Hinnaltaan apulaitteiden valmistus tulisi olemaan noin 200–300 euroa, mikä on huomattavasti vähemmän kuin DC-jännitelähteen hinta.

Loppu yhteenvetona voidaan sanoa, että molemmat ratkaisuvaihtoehdot tarvitsevat lisätestaamista, ennen kuin voidaan todeta, kumpi niistä sopisi paremmin taajuusmuuttajan elvytyslaitteeksi.

8 Johtopäätökset

Työssä tavoitteena oli etsiä ja tutkia erilaisia ratkaisuvaihtoehtoja toteuttaa elektrolyyttikondensaattoreita sisältävän taajuusmuuttajan hallittu käyttöönotto pitkän seisontajakson jälkeen. Työssä tutkittiin diodi-vastus-kytkentää ja säädettävää AC-jännitelähdetytkentää.

Tutkimuksissa selvisi, että pitkään jännitteettömänä olleen elektrolyyttikondensaattorin oksidikerros heikkenee, jolloin sen kapasitanssi sekä jännitekestoisuus laskevat ja vuotovirta kasvaa. Tämän johdosta on tärkeää, että yli kaksi vuotta jännitteettömänä olleet jännitevälipiirilliset taajuusmuuttajat elvytetään ennen käyttöönottoa.

Elvyttämisessä elektrolyyttikondensaattorin oksidikerros korjaantuu, jolloin vuotovirta, kapasitanssi ja jännitekestoisuus palautuvat normaalille tasolle. Tutkimuksissa tehdyissä mittauksissa havaittiin, että elvyttämisessä tärkeintä on, että taajuusmuuttajan välipiirin jännite ja syöttövirta eivät kasva liian suuriksi, ennen kuin elektrolyyttikondensaattoreiden oksidikerrokset ovat korjaantuneet. Tämän takia taajuusmuuttaja täytyy käynnistää niin, että välipiirin jännite taajuusmuuttajassa kasvaa hallitusti.

Työssä testattiin kaksi ratkaisuvaihtoehtoa, joita verrattiin DC-jännitelähteellä toteutettuun taajuusmuuttajan elvyttämiseen. Testituloksista havaittiin, että molempia ratkaisuvaihtoehtoja voidaan käyttää taajuusmuuttajan elektrolyyttikondensaattoreiden elvyttämiseen. Tämän hetkistä tuloksista voidaan todeta, että varsinkin säädettävä AC-jännitelähdetytkennällä toteutettu taajuusmuuttajan elvyttäminen osoittautui erittäin potentiaalliseksi menetelmäksi.

Työssä asetetut tavoitteet saavutettiin, ja tämän perusteella työtä voidaan käyttää apuna suunniteltaessa jatkotyönä valmistettavaa apulaitetta. Työssä mitattiin ainoastaan taajuusmuuttajan välipiirin elektrolyyttikondensaattoreiden elvyttämistä, jonka takia jatkotyönä olisi tärkeää perehtyä myös yksittäisten elektrolyyttikondensaattoreiden elvyttämiseen, jotta voitaisiin määritellä muun muassa, milloin oksidikerros on oikeasti korjaantunut ja miten sen korjaantuminen havaitaan.

Lähteet

1. Niiranen, Jouko. *Sähkömoottorikäytön digitaalinen ohjaus*. Helsinki : Otatieto Oy, 2000. ISBN 951-672-300-4.
2. Drury, Bill. *The Control Techniques Drives and Controls Handbook*. London : The Institution of Engineering and technology, 2009. ISBN 978-1-84919-013-8.
3. Kiel, Edwin. *Drive solutions, Mechatronics for production and logistics*. Aerzen : Springer, 2008. ISBN 978-3-540-76704-6.
4. Laihinen, Mikko ja Peltola, Mika. *Kolmivaiheinen PWM-vaihtosuuntaaja opetuskäyttöön*. Verkkodokumentti. 2006.
<<https://publications.theseus.fi/bitstream/handle/10024/9873/TMP.objres.426.pdf?sequence=2>>. Luettu 25.10.2011.
5. Niiranen, Jouko. *Tehoelektroniikan komponentit*. Helsinki : Otatieto Oy, 2007. ISBN 978-951-672-317-7.
6. Volotinen, Vesa. *Analoginen elektroniikka*. Porvoo : WSOY, 2004. ISBN 951-0-21577-5.
7. Nichicon corporation. *General Description of Aluminum Electrolytic Capacitors*. Verkkodokumentti. <<http://www.nmr.mgh.harvard.edu/~reese/electrolytics/tec1.pdf>> ja <<http://www.nmr.mgh.harvard.edu/~reese/electrolytics/tec2.pdf>>. Luettu 9.11.2011.
8. Karjalainen, Veikko. *Huoltokoulu osa 6, Kuivat ja märät elektrolyytit*. Verkkodokumentti. <http://physics.uku.fi/studies/kurssit/ELE1/luennot/hk_elkot.pdf>. Luettu 30.11.2011.

Liite 1. Testilaatikon sähkökuvat

Sivu 1. Osaluettelo

Sivu 2. Virransyöttö

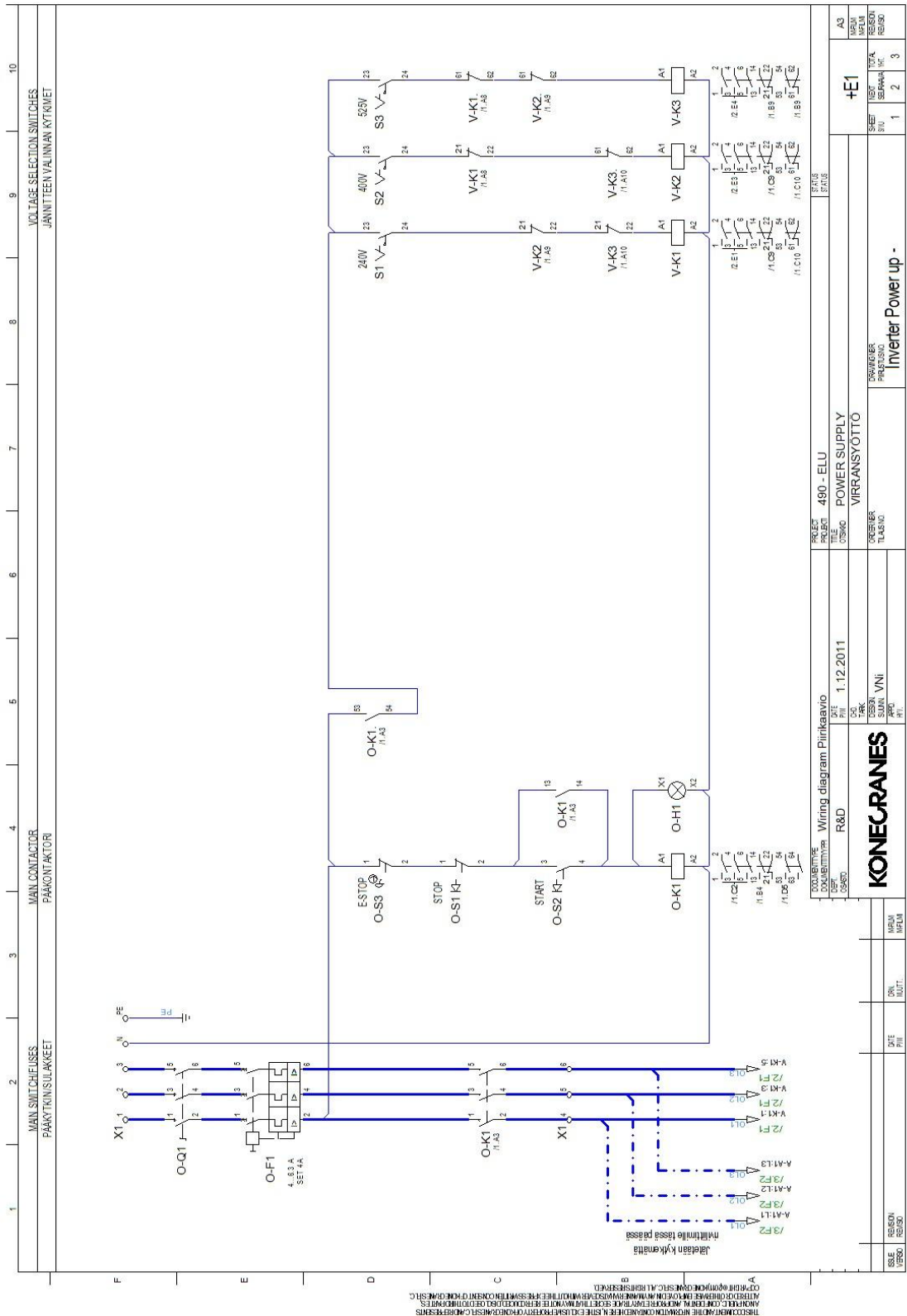
Sivu 3. Vastus-diodi-kytkentä

Sivu 4. Säädetty AC-jännitelähde-kytkentä

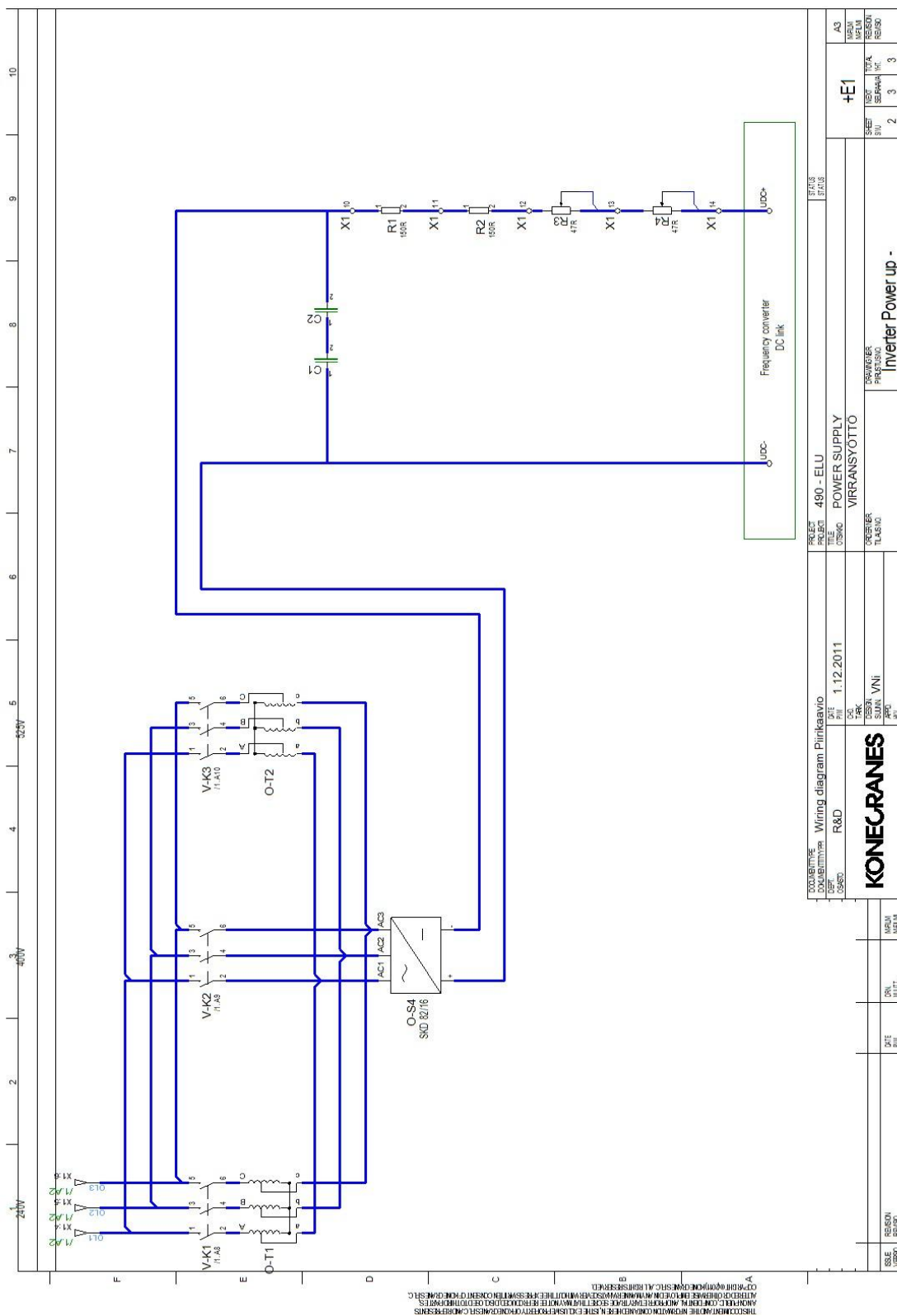
1 Osaluettelo

Positio	Nimitys
A-L1	Siniaaltosuodin
C1	Kondensaattori
C2	Kondensaattori
O-F1	Moottorisuojakatkaisin
O-H1	Merkkilamppu
O-K1	Kontaktori
O-K1.	Apukosketinlohko
O-Q1	Kuormakytkin
O-S1	Painonappiyksikkö
O-S2	Painonappiyksikkö
O-S3	Sienipainikeyksikkö
O-S4	Tasasuuntaaja
O-T1	3-vaiheinen säästömuuntaja
O-T2	3-vaiheinen säästömuuntaja
R1	Vastus
R2	Vastus
R3	Potentiometri
R4	Potentiometri
S1	Valintakytkin
S2	Valintakytkin
S3	Valintakytkin
V-K1	Kontaktori
V-K1.	Apukosketinlohko
V-K2	Kontaktori
V-K2.	Apukosketinlohko
V-K3	Kontaktori
V-K3.	Apukosketinlohko
X1	Riviliitin
X2	Riviliitin
A-A1	Taajuusmuuttaja

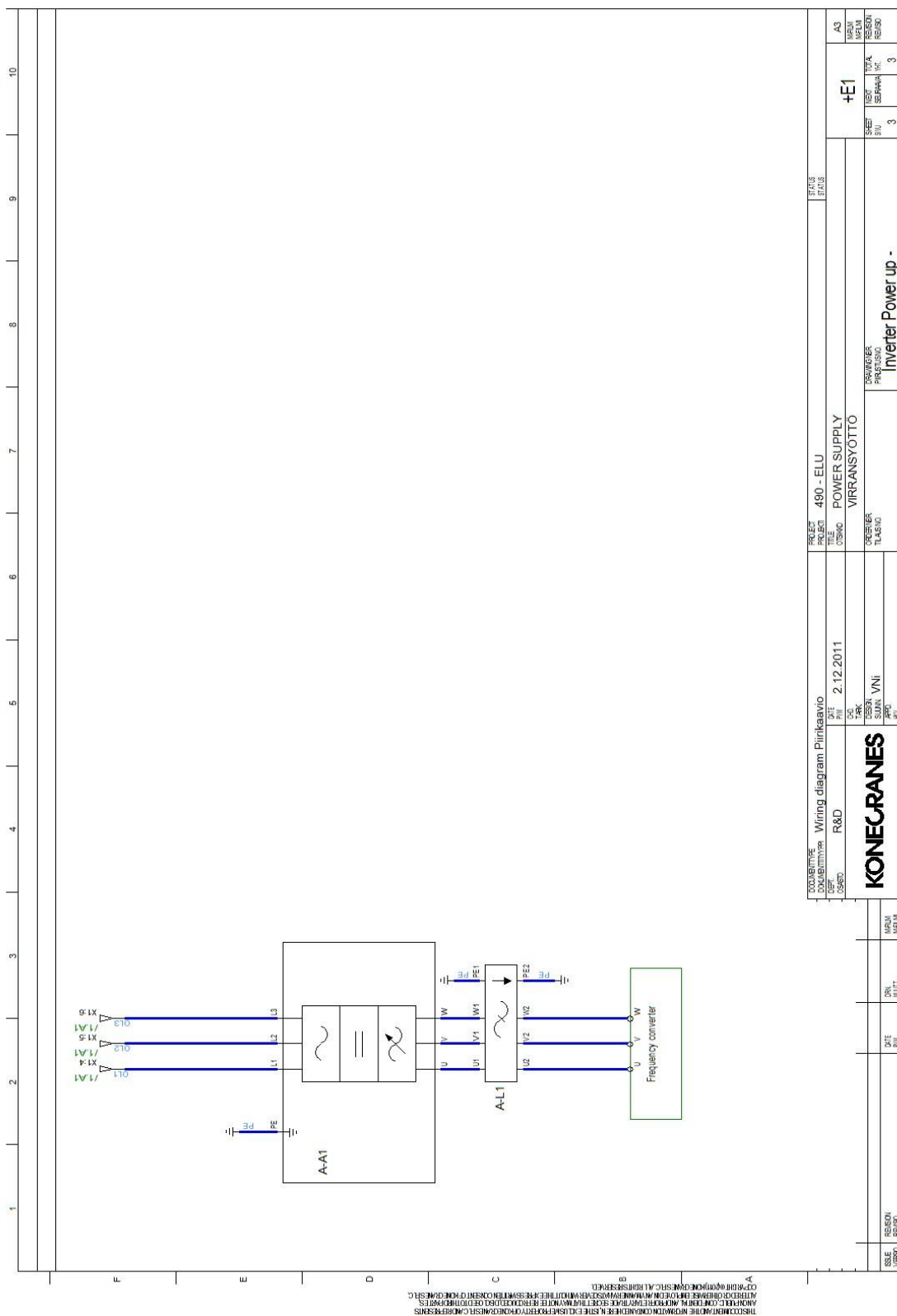
Liite 1
2 (4)



3 Diodi-vastus-kytkentä

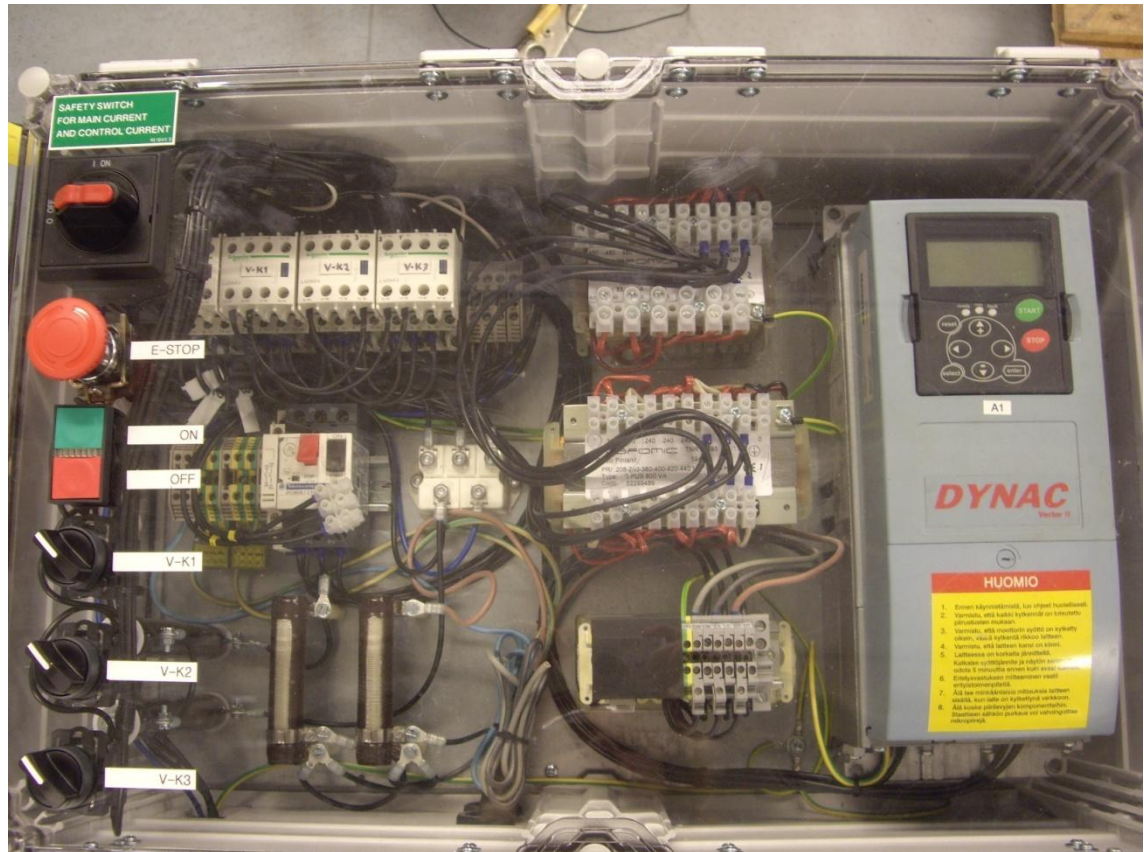


4 Säädettävä AC-jännitelähdekytkentä



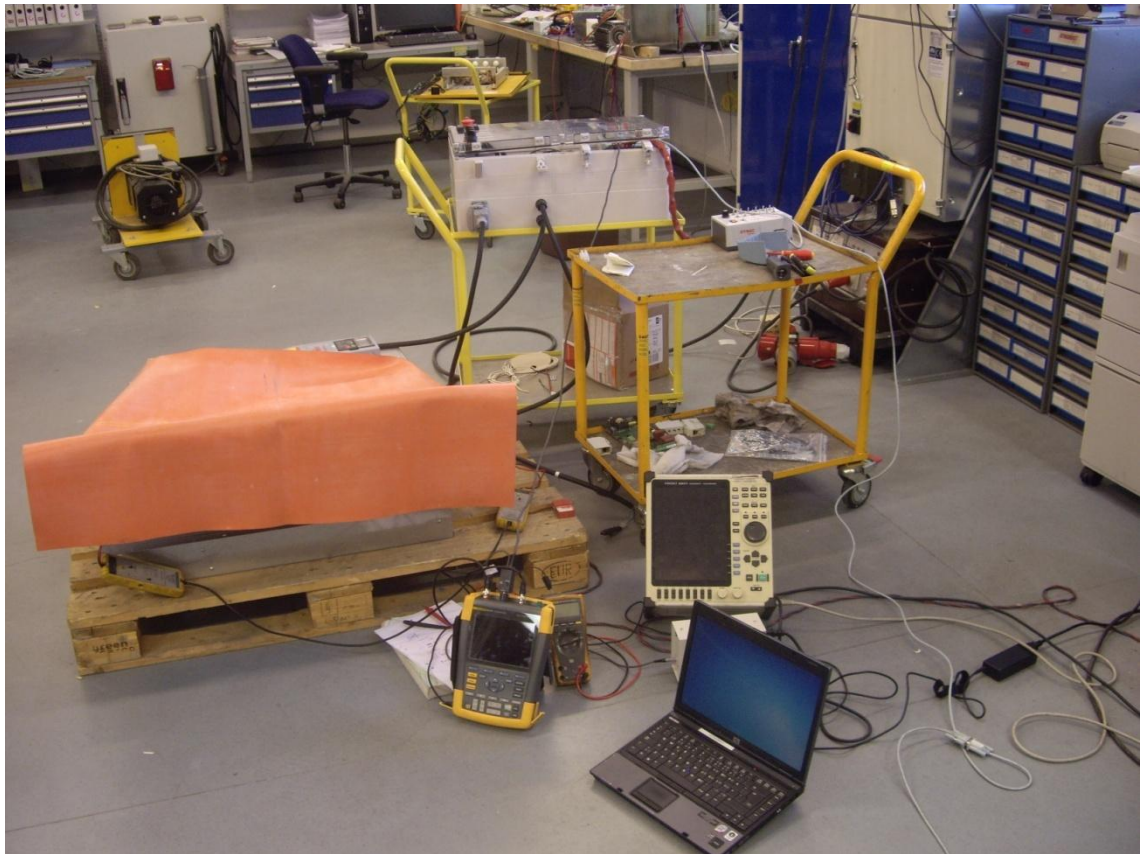
Liite 2. Testilaatikon kuvat ja testijärjestelyt

Kuvassa 1 esitetään testilaatikko, joka sisältää ratkaisuvaihtoehdot taajuusmuuttajan elvyttämiseen.



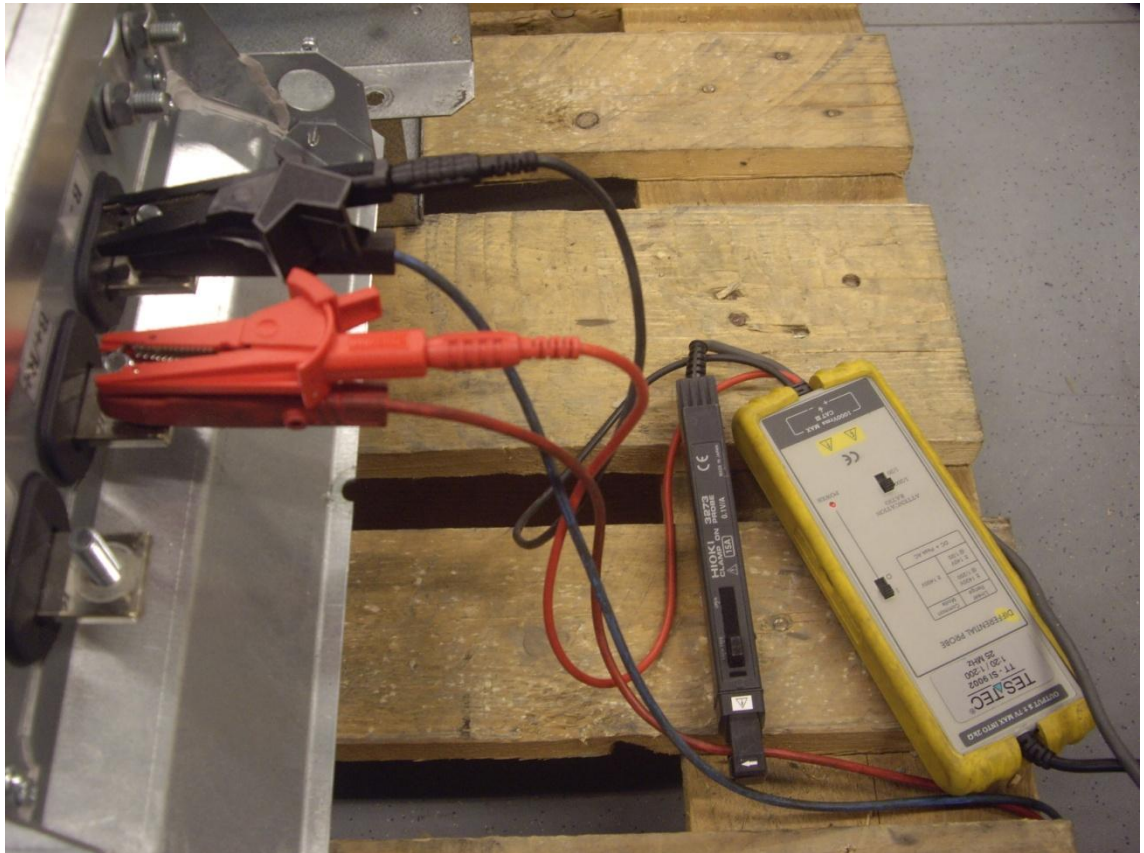
Kuva 1. Taajuusmuuttajan ratkaisuvaihtoehdot

Kuvassa 2 esitetään testijärjestelyt korjauspajalla Riihimäellä.



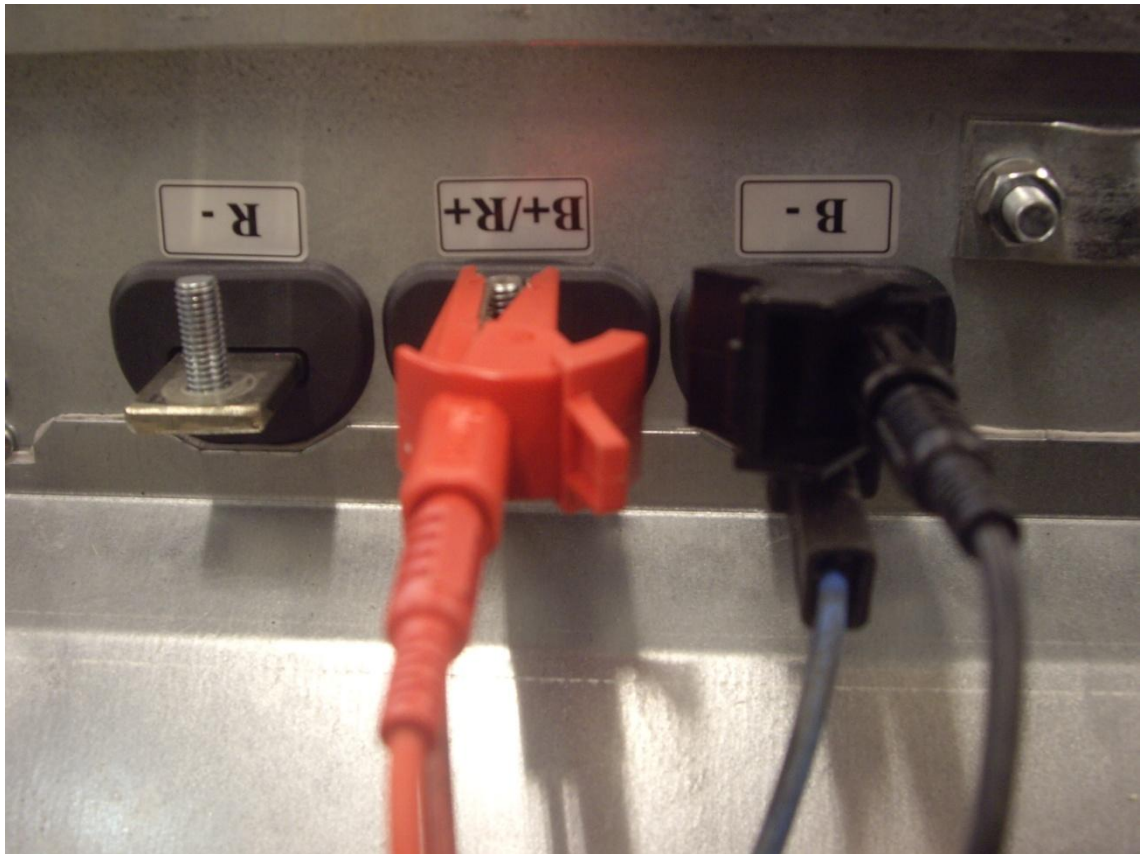
Kuva 2. Testijärjestelyt

Kuvassa 3 esitetään kuva taajuusmuuttajan välipiirin jännitteen mittaamisesta. Kuvassa taajuusmuuttajan välipiirin jännite mitattiin B+ ja B- liittimistä ja syöttövirta B+ liittimen johdosta.



Kuva 3. Välipiirin jännitteen ja syöttöjännitteen mittaaminen

Kuvassa 4 esitetään taajuusmuuttajan välipiirin liittimet B+ ja B-.



Kuva 4. Taajuusmuuttajan välipiirin liittimet B+ ja B-